

HYDROGEN

National Mission For Canada

The Report of the Advisory Group on Hydrogen Opportunities, June 1987

Prepared for: Ministry of State for Science and Technology
Ministry of Energy Mines and Resources
Government of Canada, 33rd Parliament

June, 1987

Honourable Frank Oberle
Minister of State for Science and Technology

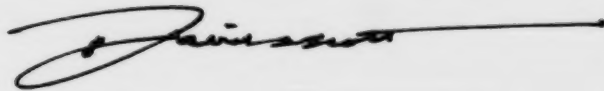
Honourable Marcel Masse
Minister of Energy Mines and Resources

Dear Ministers:

On behalf of the Advisory Group on Hydrogen Opportunities, commissioned by your Ministries in September, 1985, I have the honour to submit this report: "Hydrogen - National Mission for Canada."

The Advisory Group hopes you find the Report useful. Our wish is that it serve Canada well.

Respectfully submitted,

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "David S. Scott", with a long horizontal flourish extending to the right.

David S. Scott
Chairman
Advisory Group on Hydrogen Opportunities

ON THE MATTER OF A NATIONAL MISSION...

Sovereignty is something all nations like to claim. But the power to deliver on the claim is a function of a nation's economic performance. Economic efficiency and *effective* sovereignty are directly related - in part because sovereignty, if it means anything, means the ability to have options for self-determination.

There are two components of national economic efficiency - "productivity" and a certain measure of "distinctiveness." In recent times, when Canada has exhibited a flash of distinctiveness, it has rarely displayed the discipline and determination to carry it through to sustained commercial and cultural advantage.

A "national mission" should set feasible tasks which, if performed effectively, will provide the nation with a commercially exploitable distinctiveness. Desire and national will to achieve a national mission are not enough for success; other nations have similar desires and often have displayed stronger will. Canada should identify worthwhile emerging technologies, build steadily a new expertise, and be prepared to take strategic risks to achieve success.

This report addresses the opportunities that Canada could capture if it adopted the objective to "be first to the hydrogen age" as a national mission. What these few simple words "first to the hydrogen age" mean, is the subject of this report. The Advisory Group on Hydrogen Opportunities believes: Canada will seldom be better positioned to win leadership in a technological evolution, with predictability so compelling, benefits so pervasive, and giving Canada that measure of distinctiveness - at a time when a focus for high-technology renaissance is so needed.

MEMBERS OF THE ADVISORY GROUP ON HYDROGEN OPPORTUNITIES

David Scott, Chairman

*Professor of Mechanical Engineering, University of Toronto
Founding Executive Director, Institute for Hydrogen Systems*

Lionel Boulet, Vice-Chairman

*Chairman of the Board, Lalonde, Girouard, Letendre, & Associates Ltd., Montreal
Founding President, Institut de recherche d'Hydro Quebec*

Gordon Gilchrist, Secretary

*Proprietor, Canadian Tire, Scarborough
Former MP and Critic for Science and Technology*

Carl Beigie

*Director and Chief Economist, Dominion Securities, Inc., Toronto
Founding Executive Director, C.D. Howe Institute*

Clement Bowman

*Vice-President, Esso Petroleum Canada, Sarnia
Founding Chairman, Alberta Oil Sands Technology and Research Authority*

Réal L'Archevêque

Vice-President, The S.N.C. Group, Montreal

John Masters

President, Canadian Hunter, Calgary

George Pon

Vice-President, Atomic Energy of Canada Ltd., Ottawa

Alexander Stuart

*President, Electrolyser Inc., Etobicoke
Chairman, Hydrogen Executive Committee, International Energy Agency*

EXECUTIVE SUMMARY

Following World War II, diesel locomotives competed with steam locomotives to decide which would pull North America's trains. Diesel locomotives won. This was a competition between technologies, diesel locomotives against steam locomotives. It was not a competition between fuels, oil against coal. Yet the victor of the technological competition determined which fuel would be used. Oil won. Coal lost.

This report is about hydrogen. But it is not about hydrogen as a fuel in competition with other fuels. It is about hydrogen technologies—because they represent a unique opportunity for Canada to obtain many benefits and lead the way into the 21st century.

THE OPPORTUNITY

The world is steadily evolving towards the increased use of hydrogen, and Canada has an opportunity to lead. Today hydrogen is employed in many ways. In Canada, the most important emerging use is to improve the yield and quality of petroleum products from heavy crudes and bitumen. Canada's high demand for hydrogen and large reserves of natural gas to make hydrogen, position Canada to "lead from strength" in the development and use of hydrogen technologies. Moreover, Canada's large electricity generating capacity, coupled with a domestic water electrolysis industry, will allow non-fossil derived hydrogen to contribute when and where appropriate. The use of hydrogen also provides important environmental benefits. This special mix of circumstances gives Canada a unique competitive advantage at the dawn of the hydrogen age.

In the long term our world will see electricity and hydrogen dominate as energy *currencies*. Which energy *sources* will manufacture these currencies is much less predictable. Still, as fossil sources become depleted and the environmental disruption caused by their use intensifies, it is reasonable to expect the ascendance of *sustainable* sources. The type and mix of sustainables will be different in different regions of the world. Sustainable sources which now include hydraulic power and nuclear fission, may come to include nuclear fusion, sunlight, geothermal, tides, winds and sources not yet conceived. The societies which *use* the energy from these sources will be profoundly shaped by the dominance of electricity and hydrogen as energy currencies.

Canada can exploit its leading position in hydrogen use and supply, to build an associated *technological* leadership. Initially, the focus can emphasize natural resource applications which offer early return on investment. Then, in an appropriately phased transition, our position can be used as a springboard to be first in the development of products like hydrogen-fuelled vehicles which use "neat" hydrogen

A unique mix of hydrogen needs, supply options and key technologies give Canada an important competitive advantage at the beginning of the hydrogen age.

Civilization will converge to a future profoundly shaped by electricity and hydrogen, using technologies which employ them best.

Canada's unique hydrogen position can be exploited to develop the world's best hydrogen technologies. These technologies should strengthen existing energy industries and

(high purity hydrogen). The development can include distribution, storage, and refuelling systems. This phased hydrogen opportunity can lead to extensive new manufacturing and service sectors with markets first in Canada and later in other countries.

The need for hydrogen to upgrade of heavy crude and bitumen is immediate; the introduction of neat hydrogen technologies will begin before the year 2000. High efficiencies, cleanliness, and a unique compatibility with the electricity system will ensure that a hydrogen system expands from a few important applications to a comprehensive infrastructure in the longer term. The use of hydrogen-fuelled vehicles has just begun, with aerospace vehicles the first important example. Hydrogen-fuelled land vehicles are expected about the turn of the century. One circumstance may dramatically accelerate the use of hydrogen technologies - concern for climatic changes stemming from the greenhouse effect and other phenomena associated with the combustion of carbon-based fuels. If this acceleration occurs, Canada can benefit by leading the world in a more rapid transition to hydrogen.

Through hydrogen, Canada has a path to a positive and phased industrial evolution, a focus for national research and development, important environmental improvement, job creation, economic growth and stability - bringing benefits to all regions of the country. Nations are not often presented such a great opportunity.

provide a platform to develop hydrogen-fuelled vehicles and products for domestic and export consumption.

The need for hydrogen to upgrade hydrogen-deficient energy sources is immediate; the introduction of hydrogen-fuelled vehicles is likely to begin before the year 2000. The "greenhouse effect" may dramatically speed this process.

This remarkable convergence of circumstances gives Canada a unique opportunity for growth, stability and clean skies.

THE RECOMMENDATIONS

Canada should adopt a *national mission to position itself to: Be first to the hydrogen age*. The mission should include the following elements:

1. Hydrogen Production, Purification, Distribution and Storage

Canada should ensure it *owns* technologies which allow Canada to be the world's most effective producer of hydrogen. *Owning* technologies leads to *manufacturing opportunities* targetted at both domestic and foreign sales. The benefits of developing and thereby *owning* rather than just *using* technologies, is key to all our recommendations. Today, steam reforming of natural gas is usually the cheapest process for large scale hydrogen production. Par-

**Canada's National Mission:
BE FIRST TO THE HYDROGEN AGE.**

Canada should develop and own the best technologies for the economic production of hydrogen from either fossil or sustainable sources, and for hydrogen purification, distribution, and storage.

tial oxidation of fossil fuels and electrolysis of water are other processes. Improving the energy efficiency of steam reforming; reducing the complexity and improving reliability of partial oxidation; reducing the capital cost of water electrolysis; and achieving efficient hydrogen liquefaction, distribution and storage illustrate technology objectives which should be part of the hydrogen mission. Purification technologies for fossil-derived hydrogen need improvement, especially when the hydrogen will be used in hydrogen-fuelled products like vehicles.

2. Hydrogen Addition to Heavy Fossil and Biomass Sources

For a hydrogen mission to be successful, Canada's scientific and industrial communities must aggressively develop new and more efficient technologies for using hydrogen in the production of conventional fuels and chemical commodities from Canada's enormous but hydrogen-deficient fossil sources. These technologies should be developed primarily for projects using Canadian heavy crudes, bitumen and coal, but they may also include biomass options. These technologies and products should find markets around the world.

3. Integrating Energy Sources

Adding hydrogen obtained from natural gas to heavy fossil sources and biomass is a first step towards the more comprehensive integration of multiple energy sources. The generic advantages to integration can lead to: Improved resource utilization; environmental benefits; quality job creation; higher efficiencies; improved capacity utilization; economic benefits; and resilience to external surprises. All energy sectors must be encouraged to develop the means of both technical and business interfacing which will allow Canadians to benefit from source integration soon. Co-processing of coal and oil, and incorporating electrolytic hydrogen and oxygen into heavy oil upgrading are two other integration examples. Special opportunities to mobilize Canada's electricity generation capacity for the production of chemical fuels and commodities should be sought. An electrolysis demonstration plant of appropriate size (perhaps 100 MW) should be constructed, to develop techniques to reduce the cost of water electrolysis and to evaluate technological interfaces with the hydrogen-using industries. Opportunities to export these technologies and design-construction expertise should be sought.

Canada should develop and own the world's best technologies for using hydrogen in the production of liquid fuels and other chemical products from fossil and biomass sources.

Canada should develop and use the best technologies and most effective industrial interfacing to integrate energy sources whenever appropriate. This domestic experience will allow Canada's engineering-construction industry to seek similar foreign opportunities.

4. Hydrogen-Fuelled Products

For a hydrogen mission to be successful, Canada *must* have a program to develop technologies and products that use neat hydrogen. The first step should be to analyze and quantify the comparative advantages of several target products. As an objective, at least two hydrogen-fuelled vehicles should be selected from such options as patrol aircraft, locomotives, special duty-cycle road vehicles, and mining, forestry or construction equipment. Selections should be made on criteria of technology development merit and ultimate market potential, and should be developed through to demonstration. On-board hydrogen storage is an essential enabling technology. Although it is premature to select specific targets, our deliberations found three opportunities with several attractions:

- Hydrogen fuel cell locomotives would provide an excellent platform for technology development, could be a bonus to Canada's locomotive industry, would allow the development of a Canadian fuel cell industry, and show potential for commercial success in Canadian and foreign markets.
- Specialized hydrogen-fuelled urban road vehicles could have unique environmental and duty-cycle advantages, would initiate a hydrogen refuelling infrastructure and is a logical first step into the immense road vehicle market.
- Patrol aircraft fueled by hydrogen from two strategically located bases would have operational advantages, would enhance Canada's aerospace industry, and could play an important part in Canada's sovereignty and defence capabilities.

The importance of developing hydrogen-fuelled products cannot be overstated. At this time the lack of such products represents the single key vulnerability of Canada's competitive position.

5. Coordination and Leadership

To get the job done, a small Canadian Hydrogen Authority should be established. This Authority should not be a "performer" but should be responsible for assuring that appropriate components of the national hydrogen mission are delivered. It must act as a catalyst to mobilize the strengths of the nation's labour, technical, industrial, investor and entrepreneurial sectors. The success of the mission

Canada should develop and *own* the best technologies, systems, and products for using "neat" hydrogen (high purity hydrogen), especially hydrogen-fuelled vehicles. Aircraft, locomotives, mining and construction equipment, and special duty-cycle road vehicles may be targets of opportunity.

A Canadian Hydrogen Authority is needed to oversee and coordinate the mission. It must enlist the nation's scientific, engineering, business, labour and entrepreneurial talents.

will depend largely on the ability, imagination and motivation of these key people. The Authority should immediately retain the services of a small Technology Guidance Team drawn from the scientific and industrial communities to undertake economic and technology evaluations, which can identify the most promising areas for research and product development. These studies should be regularly updated as the guideposts for the mission. The Authority should work with NSERC to define appropriate ways to enhance hydrogen research at universities. Sufficient funds should be allocated to the Authority for an initial five years to initiate the mission. We estimate \$50 million for this purpose which should be viewed as initiation money and committed immediately. To achieve the mission, which is expected to yield benefits counted in many billions of dollars, additional funds commensurate to these benefits will, in time, be required. These should be committed on the basis of mission payback benefits. Funding for large scale procurement and demonstrations would be in collaboration with the private sector, agencies like those involved in defence or transportation, and the provinces. The Authority should report at the Ministerial level.

The Authority should offer guidance and be a catalyst, but not play a performer role. In keeping with qualities and value of the mission the Authority should report to a Minister designate.

THE BENEFITS

The mission will provide a measure of national distinctiveness which will greatly strengthen Canada's international comparative advantages.

The increased use of hydrogen processes and technologies will bring environmental benefits on several levels:

- *Site-critical:* For example - improved air quality in mines, warehouses and sports arenas as hydrogen-fuelled vehicles are introduced.
- *Urban:* For example - reduced smog and airborne carcinogens as hydrogen-fuelled vehicles are introduced
- *Continental:* For example - diminished acid rain as the use of hydrogen increases in the metallurgical and petroleum industries and as fossil fuels use declines.
- *World-wide:* For example - reduced greenhouse effect as the use of fossil energy declines.

National distinctiveness

Substantial local, national, and global benefits to the environment with special importance to the reduction of acid rain and the greenhouse effect.

Canada will be in an excellent position to develop both domestic and export economic opportunities in many spheres. For example:

- When light crude oil surpluses disappear, Canada can use its technological advantages to develop large markets for upgraded petroleum products from oil sands and heavy oils.
- Canada can design and construct facilities which use hydrogen from natural gas or sustainable energy sources to upgrade oil sands, heavy oil and coal. Export opportunities could develop within ten years.
- By about the year 2000, Canada could develop important domestic and export markets for hydrogen-fuelled products which use neat hydrogen, especially in the transportation sector.
- In the longer term, Canada could export hydrogen as a means of expanding markets for its electricity generating capacity. After the full emergence of the hydrogen age, global hydrogen trade will likely match today's movement of liquid natural gas, and might approach today's global oil shipments.

Canada will develop national energy supply systems which can mitigate the damage of unforeseen surprises—surprises which will surely occur. For example:

- Hydrogen technologies which integrate fossil and sustainable sources to produce liquid fuels would, through their technical and economic flexibility, provide resilience to disruptions caused by price flares or collapses, environmental concerns or geopolitical surprises.
- If the combustion of carbon-rich fuels causes a greenhouse effect and accompanying cataclysmic climatic changes, Canada, through its developed hydrogen technologies, can help other nations to find solutions.

Canada will have a national focus for research and development which would materially benefit the nation's universities and public and private research centers.

Canada will have an energy strategy which moves beyond energy to develop a new industrial base providing a convergence of purpose and advantages to all regions of the country.

Export of upgraded petroleum products.

Foreign and domestic opportunities in project design and construction.

Canadian manufactured hydrogen-fuelled vehicles and other products will have domestic and export markets.

Longer term export of hydrogen an important outlet for Canada's electricity generation capacity.

Strengthened resource sector having insurance against unforeseen economic or environmental surprises.

A national focus for R&D.

An energy strategy bringing inter-regional cooperation and benefit.

As resource-based economies lag behind those based on knowledge and high technology, Canada would build a new prosperity by *developing new technologies coherent with the better use of those very resources*. By beginning to build these innovative industries now, an orderly transition can avoid the distemper of prolonged economic depression that often flows from a declining industrial base. *We will win if we use our energy as a platform to develop technologies, not if we buy other people's technologies to develop our energy.*

From "smokestack" to "high-tech," from "hewers of wood and drawers of water" to exporters of technology - all with a minimum dislocation caused by an otherwise declining resource base.

Hydrogen, Canada's unique opportunity, will be positive and forward looking. It will yield desirable jobs, environmental benefits, economic stability, and national confidence born of substantive Canadian achievement.

Jobs, wealth creation, national pride and confidence in the future.

A PERSPECTIVE ...

We have argued the world will move in a staged way towards hydrogen. What if we are wrong? Consider two extreme scenarios that yield different routes to the future:

In the first scenario we prolong the fossil age indefinitely, setting aside concerns for depletion, the greenhouse effect and other environmental impacts. Assume that for the foreseeable future, the world will run on coal, oil, and natural gas, with no further introduction of non-fossil energy. In such a world, these fossil resources would have to be used very effectively. This would force the use of improved technologies to more effectively produce clean liquid fuels from heavy oils, and perhaps coal, using hydrogen from natural gas.

In this "fossil fuels forever" world, Canada would benefit from having previously mounted a national mission that brought world leadership in the production of liquid fuels from our extensive mix of fossil reserves - with hydrogen playing the key role in extending these resources. Moreover, driven by a special demand for efficient, clean, safe, and user-friendly technologies, new hydrogen-fueled products will emerge from "starter niches" (in applications like aerospace) to more widespread use in transportation and other applications. The existence of these products will provide natural gas, normally the best source of fossil derived H₂, with a special opportunity to enter new markets.

The second scenario has a different extreme. Assume world geopolitics becomes driven by concern for catastrophic global climatic changes caused by atmospheric CO₂ from the combustion of fossil fuels. The world must wean itself from fossil fuels as quickly as possible - and during that weaning emit the minimum CO₂ to the environment. Simultaneously the world must develop non-fossil sources of hydrogen and, most importantly, a full matrix of new hydrogen-fuelled products. Again, Canada would benefit from having previously established a national hydrogen mission, which built on its non-fossil electricity generation capacity and used natural gas to make hydrogen for manufacturing transition liquid fuels and for servicing the emerging H₂-fuel products.

The Advisory Group anticipates a more orderly evolution - somewhere between these two extremes. But by examining these extreme scenarios - both in their own way highly improbable - it is clear that by adopting a national hydrogen mission Canada would be uniquely positioned to achieve major benefits whatever future unfolds.



CONTENTS

On the Matter of a National Mission . . .	I
Members of the Advisory Group on Hydrogen Opportunities	III
Executive Summary	V
Contents	XIII
 PART 1: INTRODUCTION	 1
 PART 2: THE OPPORTUNITY	 6
2.1 Hydrogen Today	6
2.2 Hydrogen in the Long Term Future	10
2.3 The Transition	16
2.4 Canada's Competitive Position	19
 PART 3: THE RECOMMENDATIONS	 21
3.1 Premises	21
3.2 A National Mission	24
3.3 Program Selection	29
3.4 Providing Leadership: Canadian Hydrogen Authority	32
 PART 4: THE BENEFITS	 34
4.1 National Distinctiveness	34
4.2 A Cleaner Environment	35
4.3 Industrial Growth and Job Creation	39
4.4 Research and Development	42
 PART 5: SOME LAST THOUGHTS	 43
 APPENDICES	
1. Sample Program Details	46
2. Hydrogen Safety	61
3. Abiogenic Natural Gas	62
4. Energy Currencies	63
5. Consultations and Resource Persons	64

PART 1: INTRODUCTION

Following World War II, diesel locomotives competed with steam locomotives to decide which would pull North America's trains. Diesel locomotives won.

This was a competition between *technologies*, diesel locomotives against steam locomotives. It was *not* a competition between fuels, oil against coal. Yet the victor of the direct technological competition determined which fuel would be used. Oil won. Coal lost. The final competition between oil and coal was not decided by what we normally think determines head-to-head competitions - things like relative price or availability of those fuels. Rather, it was determined by a competition to which these fuels were bystanders, *a competition between technologies*.

The preceding paragraphs may seem an unusual way to introduce a report about hydrogen, but they illustrate a truth essential to understanding how emerging fuels enter the marketplace. That truth is that energy sources and the fuels they manufacture seldom compete head-to-head. Usually, they compete indirectly "riding the coattails" of the real competition between technologies. It is not that the availability and price of different fuels have no importance - but providing they are not so divergent that competition is precluded, the winners and losers are most often dominated by the technologies that use the fuels, not the fuels themselves.

This report is about hydrogen. But really it is about technological processes and products which are made possible by hydrogen. In turn, technology is important through its effect on quality of life - *and* as an instrument of national policy to enhance the quality of life. This report tells how hydrogen-based processes and products can create jobs, environmental benefits, new industrial sectors, stronger established industries, export opportunities, and national economic security. In short, *this report is about a brighter future for Canada*.

Still, we must understand the way hydrogen relates to energy.

Hydrogen is never a source of energy. Energy sources are things like coal, crude oil, hydraulic power, uranium, sunlight and wind. Neither is hydrogen an energy *technology* like locomotives, airplanes or automobiles. Hydrogen is an energy *currency* like electricity or gasoline. It is similar to electricity - but unlike gasoline - because it can be manufactured from any energy source. It is similar to gasoline - but unlike electricity - because it can be stored and therefore used as a fuel for airplanes and other vehicles. This makes hydrogen's role as a currency profound. Hydrogen allows a wide range of sources to be harvested more effectively. It is completely *renewable*. And it is *essential* for important emerging products and processes in heavy oil refining, transportation, communications, and chemistry.

Yet, this report is less about energy than it is about technologies - how technologies have developed in the past, how they are likely to evolve in the future, and how this evolution can be used by Canadians to capture opportunities. Because this report is about technologies it is also about competition among industries. Technologies and industries have life cycles. These life cycles can be divided into phases. While there are many ways to classify these phases, we chose the following three:

- *Embryonic* technologies (products or processes) have typically captured less than 1/2% of a market. They almost *always* require financial inputs greater than are provided by sales. The normal methods of market projections are virtually useless. Often, government plays an essential role if the technology requires long lead times and significant early investment, as in the development of large or high performance aircraft.

- *Emerging* technologies characteristically have a market share between 1/2 - 2%. They frequently still require financial inputs greater than can be generated by sales, but market projections begin to be useful for developing business plans. Government support often shifts to providing a market for the product or process, sometimes through procurement in support of national objectives like defence.
- *Established* products and processes have typically crossed the 2% market share threshold. Although individual companies may win or lose depending upon management decisions, the market share of the *generic product* or process is *little influenced by government intervention* except, perhaps, temporarily. For example, subsidies to save a coal mine cannot force railways to switch back to steam locomotives, although subsidies can keep one coal mine open at the expense of another, postponing (but perhaps worsening in the long run) social disruption.

A government role, often essential at the embryonic and emerging phases, can be harmful at the established phase. Moreover the government support needed to nurture the early phases is small compared to the payback which the established industry can provide. This payback is usually largest for an industry entering its established phase - often a period of vigorous growth. During the flat or declining part of an established industry's life cycle, government intervention requires public money tens and hundreds of times larger than during the earlier phases, but the payback is much lower and can even be negative if the intervention delays transitions essential for strong competitive positions.

The world's transition to hydrogen is launched. But the products and processes are very disparate in their life-cycle phases - ranging from embryonic to established. For example, hydrogen processes for float glass and fertilizer production are established. Hydrogen production by electrolysis is at about the embryonic-emerging stage. Hydrogen fuel cells are established in space, but embryonic in terrestrial applications. Hydrogen-fuelled road vehicles are embryonic, although many of the required components are more advanced. This *life cycle disparity* is often a barrier to the formation of linkages between technologies, and between the industries which could develop, market, and use them.

Life-cycle phasing is an important criterion for judging when government support is essential (that is, when the product will not be developed without it) and when it holds promise for the greatest payback. It is especially useful in judging if a technology is the one component missing which prevents the integration of many technologies in a major project.

But there is one more criterion beyond life cycle phase which determines when government support is appropriate. That criterion is whether the initiative brings a *direct* return to the investor (as in the case of a factory or amusement park) or the initiative *enables* a much broader community to generate wealth (as in the case of roads and geological surveys). The importance of a product, *critical* within the larger scheme of things as an *enabling technology*, can be totally overlooked if the product is considered in isolation. This issue influenced much of the Advisory Group's thinking. Of course in one sense, all recommendations for government action made in this report may be viewed as enabling - enabling many Canadians to contribute to and benefit from Canada's hydrogen opportunity.

Now let us consider how the transition to hydrogen is coming along.

Today, large quantities of hydrogen are used to manufacture commodities like fertilizer. Hydrogen made from natural gas is used to produce petroleum products from heavy oil and oil sands. This is one category of what we will call fossil derived (FD) hydrogen.⁺ This use of hydrogen will accelerate to provide a growing market for natural gas and an important opportunity to develop technologies for the production, distribution, and further use of hydrogen. In the longer term, a second wave of the transition will use non-fossil sustainable energy sources to produce hydrogen - which we will call sustainable-derived (SD) hydrogen.⁺ This second wave is expected to occur in parallel with an emergence of technologies especially developed to exploit the use of high purity hydrogen. We call these "hydrogen-fuelled products." The most important will probably be hydrogen-fuelled vehicles.

We have spoken, rather boldly, of a transition to hydrogen. The logic driving this transition may be summarized as follows:

- First, depletion and inaccessibility of high quality reserves, environmental impact, and increasing cost, are some of the reasons the world is moving *from exhaustible* energy sources (such as coal and oil) *to sustainable* sources (such as hydraulic power and nuclear fission). In time, and in special locations, the family of sustainable sources may include sunlight, tidal, wind, geothermal and eventually nuclear fusion.
- Second, at present, exhaustible *fossil* resources (coal, oil, and natural gas) are *the only* significant sources of chemical fuels and feedstocks - from which we make things like gasoline, plastics, and nylons. Therefore, if sustainable sources are eventually to take over from exhaustible sources, they *must* be able to be used for the manufacture of chemical fuels and feedstocks. Sustainable energy must make fuels for automobiles and airplanes, and material for things like plastics.
- Third, the *only way* sustainable sources can make chemical fuels and feedstocks, world-wide and in large quantities, is by manufacturing *hydrogen from water* - by splitting water into its constituent elements hydrogen and oxygen.
- Fourth, the increases in atmospheric carbon dioxide (CO₂), resulting from emissions of the fossil age, *will* lead to global climatic changes (commonly called the greenhouse effect), which may become catastrophic to the orderly growth of civilization. The *only* realistic way to deflect the impact of the greenhouse effect is through the use of sustainable energy sources manufacturing the two renewable currencies electricity and hydrogen, *neither of which emits a CO₂ waste product.*

⁺ The most important category of FD H₂ is probably steam methane reformed hydrogen (SMR H₂). In the hydrogen literature, the phrase non-fossil derived, or NFD H₂, is sometimes used for what we will call sustainable derived or SD H₂. Some hydrogen can be derived as a byproduct of other processes, such as chloralkali electrolysis, and we will call this either SD H₂ or FD H₂ as appropriate.

Therefore, there are two certainties, both of which lead to the eventual worldwide dominance of electricity and hydrogen:

- The move from exhaustible to sustainable sources can only be continued with the increased use of hydrogen, and can only be completed with the supremacy of sustainable-derived H₂ among chemical fuels.
- The continued rise in atmospheric CO₂ can only be slowed by the extensive use of hydrogen, and can only be prevented by the supremacy of sustainable-derived H₂ among chemical fuels.

The eventual transition to the dominance of sustainable sources and the pervasive use of hydrogen and electricity appears inevitable. For the next several decades the ascendance of hydrogen will be driven primarily by its use in the production of petroleum products from oil sands, heavy oil and coal. Most of this hydrogen will be made from natural gas by a process called steam methane reforming (SMR).⁺ Later, increasing amounts of SD H₂ will be introduced and will coincide with the emergence of hydrogen-fuelled products, especially vehicles.

This *progression* of waves, each involving hydrogen in a somewhat different way, is fortunate for our planet. It will allow the transition to occur with little disruptive impact on existing infrastructures.

The Advisory Group looked at Canada's hydrogen opportunities from all these perspectives. We have proposed what we believe to be a coherent and phased strategy which can bring great benefits to our Country. We believe *it is an extraordinary opportunity for Canada*. The magnitude of the benefits and the national focus and human vigour needed to capture them form the core of a *national mission*. This report *recommends that Canada adopt such a mission*. *Opportunities do not bestow benefits on those who let them pass*.

We also considered time frames. If we start at once, a national hydrogen mission could bring Canada benefits within a ten to twenty year time horizon - with visible successes to inspire confidence before ten years. The period 1996 - 2006 should therefore be used for measuring the impact and success of a mission launched today.

Still, to formulate our recommendations we tried to look to mid next century. The impact of a national hydrogen mission should grow exponentially throughout that period. But for this opportunity to be captured, confident and unequivocal action must be taken now. Canada must have the *courage* to position itself for leadership and the will to provide the *sustained* commitment that can achieve it.

+ It is interesting that even in the case of SMR H₂, half the product hydrogen comes from the water used to produce the steam.

Recommendations in a Nutshell

Our recommendations can be summarized as follows:

- Canada should adopt a national mission to be first into the hydrogen age (See Section 3.2).
- In a phased and timely fashion, Canada should choose several hydrogen projects in integrated resource systems and hydrogen-fuelled products. In these areas Canada should establish clear world leadership before the turn of the century (See Section 3.3).
- A Canadian Hydrogen Authority, made up of a small group of motivated and knowledgeable individuals, should be established. The Authority would have a "catalyst" rather than a "performer" role but, nevertheless, must be given the *authority* to get the job done (See Section 3.4).

PART 2: THE OPPORTUNITY

2.1 HYDROGEN TODAY

Consider the *value* of the telephone.

The amount of electricity used in the telephone system is not a good indicator of the *value* of the telephone system to society. Or take computers. They need only small quantities of electricity to create wealth far out of proportion to the cost of the electricity. The significance of the space program to the development of civilization cannot be measured by how much hydrogen is used to fuel the rockets. And when hydrogen is used in the production of synthetic crudes from oil sands, one energy unit of hydrogen releases more than ten energy units of petroleum products.

The importance of an energy unit of hydrogen is usually much greater than the importance of an equivalent quantity of conventional fuel. Canada uses large quantities of hydrogen. But by talking quantity, we risk obscuring that the significance of an energy currency is not necessarily proportional to the quantity which is used.

The value of hydrogen must be considered in the context of the importance of the products or processes which require that hydrogen.

Within Canada

Canada's use of hydrogen in 1986 will be about 186 Petajoules (PJ). This has the energy equivalent of about *5 billion litres of gasoline*. We can estimate the value of this hydrogen if we assume a hydrogen cost per unit energy to be \$6 per gigajoule (\$/GJ), which is equivalent to 21 cents per litre of gasoline (or about \$6.36 per million BTU). This cost is low for merchant hydrogen but reasonable for hydrogen used internally in refineries, and perhaps byproduct hydrogen from industrial processes. Using 186 PJ at \$6/GJ ($1 \text{ PJ} = 10^6 \text{ GJ}$) leads to a *conservative* estimate that the value of hydrogen used in Canada is already *more than \$1 billion annually*.

Hydrogen is used in many ways - from oil sands upgrading, to the manufacture of float glass and the hydrogenation of margarine - with a lot of other things in between. By quantity, the most important use of hydrogen is as a feedstock in the production of chemical commodities, like ammonia, which today accounts for almost half of Canada's hydrogen use. The petroleum and petrochemical industries account for more than 30%. Of the remaining, about 10% is used in the manufacture of synthetic crude oil from the Athabasca oil sands, and the last 10% for miscellaneous purposes - like that margarine.

In Canada and elsewhere, the greatest expansion in hydrogen use over the next few decades is expected to be in manufacturing petroleum products from heavy fossil sources - a process that is, in effect, "carbon conservation."

Canada has some of the world's largest oil sands deposits. These deposits cannot be harvested without the addition of hydrogen. Today, every barrel of synthetic crude from the oil sands requires about 0.30 GJ of hydrogen. The total annual hydrogen use in oil sands production has the energy equivalent of about 500 million litres of gasoline. To improve both yield and environmental acceptability of oil sands-derived petroleum products, it is expected that the amount of hydrogen used to process each barrel will increase from today's 0.3 GJ to between

0.5 and 0.7 GJ within 20 years. With an expected production increase to about 1 million barrels/day within the same time frame, hydrogen demand for oil sands development is likely to increase between six- and tenfold before 2006.

Currently, most of Canada's hydrogen is produced by steam reforming natural gas (SMR H_2). Increasing hydrogen demand will therefore provide an important growth market for natural gas. In the longer term, Canada has the opportunity to produce hydrogen from sustainable energy sources. These sustainables, like hydraulic and nuclear power, are now restricted to manufacturing electricity - that is, they are trapped in the electricity ghetto. Canada's excellent electricity generation capacity represents an important platform on which to establish leadership in SD H_2 production.

A happy feature of Canada's two hydrogen supply options is that, resulting from great disparity in the amount of hydrogen that can be produced by either, neither will impede the growth of the other. Instead, the growth that both will enjoy will tend to be mutually reinforcing because each will tend to open up different utilization sectors, which the other can subsequently supply. This is particularly true if the growth is encouraged by national initiatives.

For some time, Quebec has been aware of hydrogen's potential as a market for Quebec's immense hydraulic reserves. This is demonstrated by the construction of a 7MW electrolytic hydrogen facility at Bécancour, and by Premier Robert Bourassa's book *Power from the North* which devotes a chapter to Quebec's hydrogen opportunity. Other provinces have similar opportunities to use hydraulic and nuclear, although Quebec appears most forward looking.

In the development of hydrogen technologies, most major oil companies have hydrogen R&D programs in hydrofining and hydrotreating. The consortium of Hydro Quebec, Electrolyser Inc. and Noranda is developing advanced-generation electrolyzers, a key Canadian industrial commitment to SD H_2 technologies.

Still, Canadian hydrogen R&D has suffered setbacks. The November 1984 federal budget virtually eliminated the hydrogen program operated by the National Research Council of Canada (NRCC). Similarly, the government of Ontario terminated its support for the Institute for Hydrogen Systems within two years of the Institute's founding. Ontario appears to have viewed hydrogen in the limited context of a substitute fuel rather than as a focus for technology development. At NRCC, hydrogen was a small segment of a broad program for energy alternatives, and did not include the important aspects of hydrofining and synthetic crude production. It is noteworthy that during these cutbacks, Quebec maintained its position in developing hydrogen technologies, in part by establishing in cooperation with the federal government an electrochemical technology centre at Shawinigan. And the federal government, recognizing that hydrogen had unique features which set it apart from other "energy alternatives," established the Advisory Group on Hydrogen Opportunities.

Two organizations have special roles in Canadian hydrogen activities. The first is the Alberta Oil Sands Technology and Research Authority (AOSTRA), which has interests in hydrogen for oil sands upgrading. The second is the Hydrogen Industry Council (HIC), which represents a group of Canadian industries with hydrogen interests. The Council could play a key role in Canada's ability to capture the opportunities that hydrogen presents - especially as its membership already includes an important cross-section of the private sector, crown corporations, university and government representation.

Hydrogen Outside Canada

A unique feature of hydrogen in the United States is its use as the staple fuel for space vehicles. While this application uses less than 1% of the total hydrogen produced in the U.S., in the sweep of history it represents a milestone, because space travel is the first transportation sector dominated by hydrogen.* The space program also provides a national focus for the development of neat hydrogen technologies, including liquefaction, storage, handling, safety procedures, fuel cells, and hydrogen-compatible materials. Aircraft corporations have undertaken feasibility studies for liquid hydrogen (LH₂) -fuelled commercial aircraft. A recent plan proposes the development of a transatmospheric vehicle that could fly from Washington to Tokyo in under two hours. Although this represents a relatively small quantity of hydrogen, it is spawning a broad technology base. This will have a positive impact on the emergence of other hydrogen-fuelled products.

In Germany, the development of hydrogen technologies is taking a somewhat different path. As a partner in the European space program, the German national aerospace agency, DFVLR, is developing the new Ariane rocket HM-60 hydrogen-fuelled motor at its Stuttgart facilities. DFVLR is developing hydrogen technologies much beyond a space program. It is developing a compact hydrogen-oxygen steam generator capable of producing 40 MW. It has automobile projects with Daimler-Benz and BMW. It is developing small LH₂ pumps. It is working on magnetocaloric refrigeration in collaboration with U.S. researchers. It is carrying out on-board LH₂ storage and refuelling research for ground transportation. And with Saudi Arabia, DFVLR is developing technologies for solar generated hydrogen.

As a harbinger of hydrogen infrastructures, the German company Hüls produces large quantities of byproduct hydrogen from four processes, which include the manufacture of acetylene from natural gas, and the manufacture of chlorine and sodium hydroxide by electrolysis of brine. To distribute this hydrogen, Hüls began construction in 1938 of what is now a 210 km. pipeline system, shipping hydrogen to a total of seventeen different companies in the Ruhr Valley.

The German nuclear establishment Kernforschungsanlage (KFA) at Jülich, has a major program to develop high-temperature gas-cooled reactors targetted at both the electrical and chemical energy markets. This work includes thermochemical cycles for SD H₂ production, and high temperature methane splitting (and reassembly) in which hydrogen plays an essential role. Elsewhere in Germany, companies are developing and marketing high pressure or high temperature electrolysis units.

With these multifaceted activities, Germany probably has the most *balanced* hydrogen program of any nation. Almost all its industrial research is supported by the Federal Ministry for Research and Technology.

Several other countries, notably France and Japan, also have important hydrogen programs. For example, Air Liquide operates a hydrogen pipeline in France which is both longer and uses higher pressures than the Hüls pipeline in Germany. But this review of the German and

* It dominates, but is not the only fuel for propellants. For example, it was a malfunction of the solid propellant rocket which caused the loss of the space shuttle *Challenger*. In addition to its use as a propellant, hydrogen is carried on-board manned space vehicles where it combines with oxygen in fuel cells which make electricity - the water that results as a byproduct from the hydrogen-oxygen reaction is often used for drinking.

American activities is intended to give shape to what is happening outside Canada, not to serve as a definitive review of world hydrogen activities.

Back to Canada

The review may also demonstrate that the country with the greatest opportunity - probably Canada - is not necessarily the country that moves first to capture those opportunities.

One example showing how Canadian opportunities may be missed can be drawn from the Hüls chlorine-alkali electrolysis. This process requires the raw materials salt (NaCl), water and electricity. If we considered this same process at Ontario's Bruce Nuclear Power Development, we would see that few places in the world have cheaper electricity, are as close to large underground salt deposits, or have more fresh water than the BNPD. In Germany the product chlorine is used, among other things, for the production of PVC and chlorinated hydrocarbons. For a second example we can turn to Alberta. There, in the absence of a pipeline, a recent study by the Hydrogen Industry Council has shown that about 600 tons per day of byproduct hydrogen from different industries is vented into the atmosphere. Using our \$6/GJ this represents almost half a million dollars a day "into the air."

We can summarize the Canadian hydrogen situation as follows:

- The value of hydrogen used in Canada today is more than \$1 billion per year.
- The multiplier effect of hydrogen in the creation of wealth is higher than conventional solid and liquid fuels, and probably approaches that of electricity. Hence the economic impact of hydrogen processes and products is several times \$1 billion per year.
- Most Canadian hydrogen is used as a feedstock in the production of chemical commodities and petroleum products.
- Hydrogen usage will increase as new technological developments are introduced.
- Natural gas is the main source of today's hydrogen. An increasing hydrogen demand will provide an important growth market for natural gas.
- In Canada, the industrial development of hydrogen technology is found in petrochemical products and processes, and in water electrolysis.
- There is no significant Canadian activity to develop hydrogen-fuelled products for transportation or stationary applications.
- There is no significant Canadian activity to develop technologies for hydrogen distribution, storage or refuelling.
- Canada's electricity generation capacity is well positioned to become an important strategic source for the production of SD H₂ from water.

2.2 HYDROGEN IN THE LONG TERM FUTURE

Computers and the telephone system require electricity but are not influenced by whether the electricity is made from coal, nuclear or hydraulic sources. A jumbo jet flying to Europe drinks turbo fuel, but does not care if it is made from conventional crudes or oil sands bitumen. *Currencies*, not sources, characterize the products and processes which use energy.

In the long term, energy transactions will be dominated by the currencies hydrogen and electricity. It is more difficult to name the energy sources which will be used to manufacture these currencies. But, much more than the unpredictable sources, the *predictable* currencies *electricity* and *hydrogen* will *shape the world's future*.

Rationale for an Emerging Hydrogen and Electricity Age

As we summarized in the Introduction, the major reasons for the move to the hydrogen age are:

- The world's high quality fossil fuel reserves are being depleted. It is not that we will run out of oil, or coal, or oil sands, but that the remaining reserves will be lower in quality and more difficult to extract, leading to higher production costs and the potential for increased environmental damage. The problems associated with fossil fuels will encourage a move toward sustainable sources.
- The environment is another force driving the move to sustainable energy sources. The impact of fossil fuels is well known for the production of acid rain and smog. But the world now faces an additional environmental issue without precedent - the prospect of global climatic change, often called the greenhouse effect, brought about by the increased levels of carbon dioxide in the atmosphere. Fossil fuels probably contribute most to the greenhouse effect, although it is aggravated by other industrial emissions and worldwide deforestation. There is little possibility our world can avoid a mean global warming of at least 2°C by mid 21st century. This warming will be accompanied by substantial regional climatic changes, interrupted food production cycles, and regional droughts. In the long term, coastal regions which include most of the world's great cities could be destroyed by rising ocean levels. Even with aggressive moves to reduce CO₂ emissions beginning at the turn of the century, atmospheric CO₂ concentration will have doubled since pre-industrial revolution days by 2050. And so, long before we "run out" of fossil fuels, the world must move to sustainable sources which do not dump CO₂ wastes into the atmosphere.
- Today's fossil sources (solid, liquid or gaseous) are the only significant sources of chemical fuels. Moreover, fossil sources are used for many chemical commodities. Therefore, sustainable energy sources must manufacture a currency to substitute for gasoline, turbo and other transportation fuels. Hydrogen is the only currency available.
- All sustainable energy sources can be used to manufacture either electricity or hydrogen. Both are renewable in the true sense of the word. Electricity, which may be viewed as an electrical charge separation, returns to a charge neutrality when it is used. Hydrogen, which in this context may be considered "water separation," returns to water when it is used. This renewability is the essential quality that removes all negative environmental impact - things end up the way they were. And, of course, it lays to rest the question of

"running out" - we can no more "run out" of hydrogen than we can "run out" of electricity.

- The *only* chemical currency which can be manufactured in necessary quantities by all sustainable sources, world wide, *is* hydrogen. There is no other possibility. The question has been asked many times - "Is there another option?" None have appeared. It is a remarkable stroke of fortune that this single option has so many attractions.
- Among today's sustainable sources, hydraulic is the most important throughout Canada, although nuclear plays an equal role in Ontario. Unlike Canada, nuclear is much more important than hydraulic in most developed nations. If the growth of conventional nuclear fission is slowed (due in part to the Chernobyl accident), then the move to sustainables may be temporarily delayed - while improved fission and other sustainable technologies are developed. But it is the emergence of sustainable sources, *not which* ones dominate, that is important.
- One last question may remain. If we accept that we must eventually use sustainable rather than fossil sources, and that these sources can manufacture electricity, we might ask: *Why not do everything with electricity?* One answer is, of course, that electricity is not storable and is not a material - electricity cannot be used to fly an airplane. But perhaps an even more important response is: Why would we *want* to do everything with electricity - when hydrogen is available, and when electricity and hydrogen work together so well?

Characteristics of the Hydrogen Age

To understand how hydrogen and electricity* will share tasks, it helps to know how they complement each other:

- Hydrogen can be stored in enormous quantities; electricity cannot.
- Electricity can transmit energy without moving material; hydrogen cannot.
- Hydrogen can be a chemical or material feedstock; electricity cannot.
- Electricity can process and store information, hydrogen cannot.
- Transportation of hydrogen can match the continental distances of natural gas and perhaps the worldwide movements of oil; transmission of electricity is more limited.

It is apparent that these two currencies are complementary, and can satisfy the consumer and industrial needs of the future. Electricity will continue to be used as it is today: for illumination, for information processing, for fixed-route high-frequency transportation systems like subways, high density trains, and perhaps, in the long term, high speed vacuum tube vehicles. Hydrogen will be the currency of choice for most activities now satisfied by liquid fuels. Airplanes will fly on hydrogen, free-range vehicles like cars and snowmobiles will be fuelled by

* Our use of the word electricity is intended to include its surrogate, electromagnetic radiation, in all regions of the spectrum.

hydrogen, as will trains (except possibly on very high density routes like subways). And hydrogen will be used in the production of man-made materials like fertilizers and plastics.

Because electricity has been with us for almost a century and now profoundly shapes our lifestyle, we are familiar with electrical technologies. Although computers, television sets, and home videos will undoubtedly enjoy further development and many new electricity-fuelled products will be introduced, most can be imagined as some evolution of today's products.

On the other hand, the technologies and products using hydrogen, for flying airplanes and powering the car for the drive to the cottage will, *generically*, be very different from the technologies which perform these tasks today. Just as a horse did not resemble an electric motor when electricity substituted for hay in pulling streetcars, the generic propulsion systems of hydrogen automobiles are unlikely to resemble the internal combustion engine of today's Chevy. Even those heat engines which are hydrogen-fuelled will bear little resemblance to today's heat engines. For example, engines for hypersonic hydrogen-fuelled commercial aircraft will differ greatly from today's aircraft engines.

Some tasks could be served by *either* hydrogen or electricity. Space heating is a good example. It could be done by electricity as it often is today, or by hydrogen. Hydrogen could be combusted on, for example, catalytic baseboard heaters with some emitted water vapour contributions to humidification and any excess condensed. Since no chimney would be needed to vent the products of combustion, all the hydrogen's energy could go to heating rather than losing some of it up the stack as in today's oil and gas furnaces. Moreover, unlike electricity, hydrogen has few load-leveling demands. On the other hand, electric heat pumps provide heating and cooling very efficiently and this technology will continue to improve. Therefore, it is difficult to predict whether electricity or hydrogen will win for keeping us warm. Probably both will have their niches. And a camper can still have a wood fire.

This discussion of the "currency of choice" applies to services we understand today. Although it is commonly said that "necessity is the mother of invention," the reality is more often that "invention is the mother of necessity." History shows that when an energy currency is introduced, many new technologies are invented, grow into widespread acceptance and then become essential. A hundred years ago people would not think a telephone essential, although the forward looking mayor of one American city was delighted to say he could "visualize a day when every city would have one." Today's essential telephone technology could not even be imagined before people began experimenting with electricity.

In this spirit, it is difficult in 1986 to speculate on the technological marvels which will emerge as civilization begins to use hydrogen in everyday life. But that there *shall* be a new set of hydrogen products is certain - because hydrogen has properties almost as unique as electricity - and imaginative people will think of ways to develop products which exploit these properties.

The hydrogen and electricity age will have *five* additional characteristics.

- First, the world will be cleaner. Cities in particular will be environmentally better places to live. The smog, most carcinogenic emissions, and many other pollutants that are associated with large cities could be largely eliminated.

- Second, compared with today's petroleum-based technologies, hydrogen technologies will generally (1) be more efficient, (2) last longer and require less maintenance, and (3) have higher purchase costs which are offset by lower life-cycle costs. These characteristics will be in phase with the move away from the "throw-away" society, a trend we see beginning today. The world will have evolved from a pre-industrial age "conserver society" (required by poverty), through to the "throw-away" society (in the first blush of technology produced abundance) and then back to a "conserver society" (using efficient, high-quality, long lasting products).
- Third, the importance of electrochemical energy conversion technologies will grow, perhaps to eclipse today's ubiquitous heat engines. All living things convert their fuel (food) to work - for growing, running, swimming or flying - by electrochemical processes. But about two centuries ago when mankind first invented machines to convert fuel to work, the electrochemical way of nature was not copied. Rather, heat engines were invented, of which the first example was the steam engine. Electrochemical energy conversion is inherently more efficient, although it characteristically suffers from low power densities compared to heat engines. Hydrogen is particularly suitable for electrochemical devices and its availability will no doubt lead to the development of high energy density technologies.⁺
- Fourth, hydrogen will do more than just substitute for today's fossil fuels. Hydrogen will truly work together with electricity. Electricity can easily be converted to hydrogen. Hydrogen can easily be converted to electricity. The two currencies are fully interchangeable, which is not true of today's currencies. Today, electricity can be made from fossil fuels, but gasoline cannot be made from electricity.
- Fifth, in the far future, some predict most of the world's energy will come from a small number of huge central sources. These sources could be solar stations in the Sahara or on floating platforms in the south Pacific, or nuclear fusion plants in remote locations. Hydrogen can be made *directly* from these sources without going through an intermediate electricity step. Hydrogen will then be the dominant first-stage currency because, compared to electricity, its delivery and storage flexibility will allow it to become a global trading commodity. Electricity will normally be manufactured locally, perhaps on demand from hydrogen using fuel cells. Thus, the far future may properly be called *the hydrogen age*.

Perhaps the most important thing is yet to be said. Knowing that the hydrogen age is approaching can do much to remove fear for the future. If civilization can avoid nuclear war, hydrogen and electricity can offer a brighter 21st century. Brighter skies. Brighter work conditions. Brighter quality of life.

⁺ Today's electrochemical energy-conversion technologies include storage batteries, fuel cells and electrolyzers. Just about everything else that converts a fuel to electricity or work is a heat engine. This includes automobile and aircraft engines, and even nuclear power stations. Using hydraulic and wind power does not convert fuel to work or electricity, rather it converts potential or kinetic energy - so these are neither electrochemical devices or heat engines. Here we are using a broad interpretation of electrochemistry to include ion exchange and membrane processes.

When Will the Hydrogen Age Be Here?

There are several ways to examine this issue.

First, we can look at the evolution in the mix of energy sources to estimate when sustainable sources will provide more energy than can be absorbed by the electricity market. Based on this analysis, SD H₂ is expected to begin being manufactured in significant quantities at about the turn of the century. Second, we can examine the evolution in the hydrogen/carbon (H/C) ratio of the *currencies* used by civilization over the past 150 years. This shows a steady progression to increasing H/C ratios, and again indicates significant quantities of pure hydrogen use about 2000-2006, with growing use thereafter. Third, we can note the rise in the CO₂ content of the atmosphere. While this approach is less amenable to formal analysis, it does appear reasonable to expect world political action to reduce CO₂ emissions around the year 2000.

The Advisory Group considered the timing from these and other perspectives to conclude the following:

By the middle of the next century, it is reasonable to expect that nearly half the primary energy will be provided from sustainable sources, with the rest from fossil sources. The predominant fossil source is expected to be natural gas. Oil and coal can be expected to be mined primarily for their carbon content, and through the extensive use of hydrogen addition little CO₂ will likely be rejected when they are used to manufacture what we now describe as "petroleum products." Consistent with these estimates, it might be reasonable to assume that by mid-century the currency market will be divided roughly into thirds: One third electricity, one-third liquid hydrocarbons, and one third hydrogen. About two-thirds of the hydrogen will probably be produced from natural gas, and the rest from sustainable sources.

After the mid-21st century, energy sources which have not yet been imagined may emerge. (Some of these have been generically described as "musion" - on the basis that when physicists work with subatomic particles, sooner or later they will think of a way to use this knowledge to provide a new energy source.) One or more of these could, in time, become more significant than any of the sources we now use or are developing. But the uncertainty on long term sources does not carry over to currencies. No logic we can construct leads to a new set of energy currencies emerging after electricity and hydrogen are fully adopted.

But for the purposes of this report, the most important conclusions of these timing considerations are as follows: It is reasonable to expect a significant penetration of SD H₂ to begin about the turn of the century and grow rapidly thereafter. At about the same time, it is also reasonable to expect the use of hydrogen-fuelled products to begin in earnest.

The turn of the century is thirteen years away. Thirteen years ago it was 1974. Does that seem a long time ago?

Why We Looked at the Long Term Future

A sense of the long term future allows Canadians to plan initiatives for today. In projecting the future we never know everything. But we seldom know nothing. For our energy future, we are fortunate to know more about currencies than sources. Most countries are betting on different sources. Canada would be wise to bet on currencies, because whenever a new source wins it will be used to make the currency hydrogen as well as electricity.

In planning national initiatives for the next 10 - 20 years we would be foolish to demand clairvoyance in detail or precision in timing. But we can use what we *do* know to set us off in the general direction - anticipating some mid-course corrections later.

Still, we might wonder why Canada should be first. We might fear moving too quickly or too slowly. We might fear being late or early. In the important technological developments of the late 20th century Canada has much experience being late. Little has been gained by that. It would be exhilarating to risk being early.

2.3 THE TRANSITION

Looking ahead to the hydrogen age, it seems circumstances have contrived to make the transition easy. Easy, because the transition evolves naturally from what the world is already doing.

This evolution is taking place in two waves.

The first wave grows out of the key role hydrogen plays when the inputs from two or more energy sources are integrated for the more effective production of several energy currencies. We call this wave *Resource Integration Systems*. An example in common use today is the integration of natural gas and heavy oil to produce petroleum products. In the future, nuclear and hydraulic can be integrated with natural gas, heavy oil and coal to produce electricity, hydrogen, petroleum products and other commodities.

The second wave is the use of neat hydrogen in technologies *specially designed to exploit* the properties of hydrogen. These technologies are called *Hydrogen-Fuelled Products*. Today's best known example is space vehicles. In the future we will have hydrogen-fuelled trains, airplanes, and other products.

Resource Integration Systems

To help understand the importance of resource integration, we can divide present energy sources into two categories: (1) the remaining solid, liquid and gaseous fossil sources, and (2) the emerging non-fossil sustainable sources.

As high quality solid and liquid fossil deposits are mined, the remaining reserves are characterized by *lower* hydrogen to carbon (H/C) ratios. Simultaneously, the world demand for *high* H/C ratio liquid fuels is *increasing*. Thus hydrogen deficiency characterizes solid and liquid sources. On the other hand, the gaseous fossil source, natural gas, has a H/C ratio of four, which makes it carbon deficient for the direct production of liquid fuels. Therefore, when used as a *single input* for the production of liquid fuels, any one of these sources is flawed by a H/C ratio mismatch.

Of the two mismatches (carbon deficiency of natural gas and hydrogen deficiency of solid and liquid sources), by far the most critical is the *generic hydrogen deficiency* of solid and liquid fossil sources. The overall situation is illustrated in the following table:

Commodity	Atomic H/C Ratio
Natural gas	4
Liquid fuels (<i>currencies for automobiles & aircraft</i>)	2.1 - 2.3
Conventional crude oil	1.8 - 1.9
Athabasca oil sands bitumen	1.4 - 1.6
Typical coals	0.7 - 0.9

The impediments caused by H/C mismatch can be greatly reduced by using energy systems which integrate several energy sources. Natural gas and bitumen is a typical first-generation integrated system. It is common today. And the tie that binds this union is hydrogen.

But the integration of the finite resources of heavy oil and natural gas is just the beginning. Sustainable sources *also* suffer from mismatches and once again integration - this time between sustainable and fossil sources - greatly reduce the inherent limitations of *single* sustainable sources.

The *generic* limitation of sustainable energy sources is a *daily or seasonal demand-supply mismatch*. For example, nuclear power reactors operate most economically at a steady load - preferably at full capacity. Other sustainables, like tidal, wind, and solar suffer even greater demand-supply mismatches. The sun does not necessarily shine when the demand for electricity is highest - typically at suppertime in December. As sustainable sources provide an increasing fraction of our energy, the generic demand-supply mismatch will increase in severity. (For example, as CANDU supplies more than base load, load-leveling constraints impinge more and more on CANDU operation.) The reason for this demand-supply mismatch should not be viewed as a flaw in sustainable sources themselves. Rather, it is a *systemic* flaw, because these sources are trapped into producing the single currency electricity.

Today, hydrogen integrates natural gas and bitumen to produce synthetic crudes. In the future, hydrogen will also integrate sustainable and exhaustible sources. Sustainable sources can be used to manufacture hydrogen during low electricity demand, and the hydrogen can then be used to reduce the hydrogen deficiency of heavy fossil sources. Hydrogen thereby becomes an integrating tether which reduces the generic limitations of both heavy fossil and sustainable sources. Hydrogen will be the "currency of cooperation."

In principle, there are three broad benefits from integrating energy sources.

- First, the *environment* benefits because much less CO₂ is rejected to the atmosphere.
- Second, the integrated approach to energy production is inherently more *resilient* to surprise. For example, if new electricity generation capacity outstrips the demand for electricity, this increased capacity can be funnelled into the manufacture of liquid fuels and chemical feedstocks. Or, should future oil embargoes jeopardize supplies, the energy from sustainable sources can contribute to the production of petroleum products. (These are different problems but have a similar solution.)
- Third, integrated systems normally consume less natural resources and less energy for the same output.

Hydrogen-Fuelled Products

The second wave to the hydrogen age, made up of hydrogen-fuelled products, has its most obvious start with mankind's leap into space. A space shuttle or lunar landing module could never use turbo fuel because the weight penalty would be too severe. Similarly, the proposed transatmospheric vehicles - half aircraft, half spaceship - will *have* to use hydrogen. These are applications where *no other fuel* than hydrogen is technically feasible.

Later hydrogen-fuelled products will gain market footholds in applications where conventionally fuelled products *could* be used, but where hydrogen-fuelled products have some clear advantages in cost, efficiency or environmental benefits. Hydrogen mining vehicles are one such example. Today diesel equipment is used, but the environmental benefits for the miners and the reduction in the cost of air circulation could provide the competitive advantage for hydrogen. Fuel cells will allow much higher efficiencies and this will, in itself, provide sufficient advantage to allow competitive advantage in some circumstances.

Another attractive opportunity for the fuel cell might be in railway locomotives. Further out on the time horizon, hydrogen-fuelled family automobiles, probably using hybrid fuel cell-storage battery power trains, will run cleanly about our cities' streets.

How the Two Waves Merge

Today these two waves to the hydrogen age - resource integration and hydrogen-fuelled products - have few interfaces. But as the amount of hydrogen used in both sectors increases, the benefits from cooperation with the other will increase. For example, hydrogen distribution systems such as pipelines and storage tanks, will serve industries using hydrogen in integrated systems as well as supplying hydrogen for hydrogen-fuelled products. But much before the distribution and delivery infrastructures knit the two sectors, there can be many other advantages to collaboration. A few examples are technology development for hydrogen-compatible materials, industrial codes, and the technologies of hydrogen production and purification. This collaboration can also lead to the earlier assembly of joint ventures for business opportunities.

2.4 CANADA'S COMPETITIVE POSITION

The transition to hydrogen will have an impact on lifestyles and nations comparable to the introduction of fossil oil displacing whale oil, or light bulbs displacing oil lamps and candles. Nations and industries at the leading edge of a transition of this magnitude position themselves for benefits lasting several generations. This issue of "positioning" is key. The Advisory Group developed a set of criteria by which Canada's competitive position could be evaluated.

Basic Criteria for a Competitive Hydrogen Position

- If a nation has substantial reserves of hydrogen-deficient hydrocarbons, it is well positioned to lead the transition to hydrogen. While both coal and heavy oil satisfy this criterion, it is easier to manufacture liquid fuels from oil than from coal, and hence, heavy oils and oil sands provide a larger advantage.

Canada has some of the world's largest oil sands reserves as well as sizeable coal and heavy oil deposits.

- In most circumstances for the next few decades, the most economic method of producing hydrogen will be by steam reforming natural gas. Advantages will accrue to countries with abundant and accessible natural gas supplies and existing natural gas infrastructures.

Canada has abundant reserves of natural gas and a well developed natural gas infrastructure.

- Nations with a well established non-fossil electricity generation capacity (practically, today this means hydraulic or nuclear), which can produce electricity below normal world cost, can use this capacity to secure world leadership in SD H₂ production.

Canada is a world leader in the generation of electricity from hydraulic sources and also has an unusually successful nuclear reactor. Hydraulic projects in northern Quebec, Labrador, Manitoba, and British Columbia and nuclear projects in Ontario could all participate. Electricity from these sources is produced at about half the cost of electricity produced in most regions of the world.

- A nation with a strong non-fossil electricity generation capacity would benefit from the existence of an indigenous electrolysis industry.

Canada has one of the world's longest established electrolyzer manufacturing industries.

- A nation with a reason to develop specialized hydrogen-fuelled products will have a clear advantage in using this base as a springboard to develop a broad spectrum of hydrogen-fuelled products.

The United States and the European Community with their extensive aerospace applications have such a competitive advantage. Germany has a broad range program to develop hydrogen-fuelled products. *Canada has no position.*

What This Means for Canada

Canada could use its *need* for hydrogen in resource integration as a platform to build world leadership in hydrogen technologies. But to exploit these circumstances, Canada must aggressively position itself to develop its *own* technologies for hydrogen-based resource integration opportunities *and* it must develop hydrogen-fuelled products.

Through a quick start, sustained commitment, and hard work, Canada could catch up to the countries now developing hydrogen-fuelled products - because, although others may lead, the *magnitude* of this leadership is not overwhelming since, inherently, hydrogen technologies are at embryo or emerging life-cycle phases. Conversely, those countries which now lead Canada in the development of new technologies cannot match Canada's natural resources. By commitment and hard work we can catch up on hydrogen technologies. No amount of commitment or hard work can plant heavy oil and gas in the ground or hydraulic reservoirs on top of it.

We should also recognize that few other countries have Canada's unique combination of history, geography and culture which provide special advantages for hydrogen development. Geographically Canada has the second largest land area in the world, with one of the lowest population densities. Transportation and communications are therefore of strategic importance. Hydrogen-fuelled vehicles and fuel cell-powered communication stations provide opportunities for leadership which build directly upon this strategic need. Canada's history and culture have provided an important record of achievement in resource and transportation initiatives. Examples include continental railways, the St. Lawrence Seaway, snowmobiles, oil sands development, hydraulic generation capacity, and the development of the CANDU reactor.

These cultural and geographical ingredients of national character can aid in implementing a national hydrogen mission. Canada is recognized as deriving most of its wealth from natural resources. It is therefore logical that it build and extend its future wealth upon the integration and development of those very resources - thereby developing and strengthening national distinctiveness. *Then* Canada should export products and abilities around the world.

What this means for Canada now becomes clear:

Canada will seldom be better positioned to win leadership in a technological evolution, with predictability so compelling and benefits so pervasive. And we could add - when a focus for high-technology renaissance is so needed. In this spirit the Advisory Group presents its recommendations.



PART 3: RECOMMENDATIONS

3.1 SOME PREMISES

Time Frame

This report, its recommendations, and estimates of the benefits are based upon a 10 - 20 year time frame. This period was chosen for several reasons:

- Within a 10 - 20 year period, the world evolution towards hydrogen should be visible to all industrialized nations. If Canada adopts a national mission now, Canadian leadership can be firmly established both in the national conscience and in its industrial base. If Canadian commercial leadership has *not* been established within that period, the magnitude of the national effort required to establish an equivalent position at a later date will make the benefits of leadership unattainable.
- Ten to twenty years is beyond the normal planning horizons of Canadian industry, which seldom makes investments with payback times longer than ten years. While a longer time frame - say 50 years - is too far away for normal political initiatives, the 10-20 year horizon is precisely the time frame for which governments should assume planning roles. There are many precedents for this time horizon - from Japan's development of industrial CAD/CAM,⁺ to American development of large aircraft, to Canada's building a railroad to bring the country together.
- Finally, for the success of a hydrogen mission, a reasonable time-frame is essential. It will allow challenging but realistic targets for measuring progress. And it is *essential* for sheltering R&D and longterm business planning from the debilitation of discontinuities. (Winners are those who keep their eye on the long haul, *especially* when this requires persevering against the fads caused by seemingly changed circumstances for short periods).

The recommendations of this report cover a period from now to the early years of the next century. An improved national morale would likely occur immediately, some visible achievements would begin as early as 1991, and a significant contribution to the national well-being would follow during the 1996 - 2006 period. Implementing these recommendations will lead to a balanced but precocious childhood for Canada's hydrogen age. These recommendations are to get Canada started, not to plan Canada's hydrogen adulthood. Adulthood will look after itself - for "The childhood shows the man, as morning shows the day."[†]

Costs of Hydrogen

The Advisory Group assumes that over the next twenty years, hydrogen will be more expensive than conventional fuels on the basis of cost per unit energy - for example, in dollars per gigajoule [\$/GJ]. Since over this period the greatest quantities of hydrogen will be derived from natural gas, it follows that SMR H₂ will set the reference price for hydrogen.

⁺ Computer aided design and computer aided manufacturing.

[†] John Milton, *Paradise Regained*

^{*} The process used to make the H₂ from natural gas is steam methane reforming - hence the product is called SMR H₂ (see footnote p. 3)

The cost of hydrogen per unit energy is not likely to be more than twice the cost of natural gas when manufactured in large quantities. In fact, 1.6 times the natural gas cost seems reasonable for gaseous hydrogen. The cost of liquefaction could add an additional 30% to 50% for liquefied hydrogen. The cost of hydrogen may drop to a lower multiple of natural gas with improved steam methane reforming technologies and also, with favourable site-specific circumstances for sustainable-derived hydrogen (SD H₂).

This ability to project and tie the cost of the new energy currency - hydrogen - to the cost of a well-established currency - natural gas - is important for business development. Investors planning to develop new hydrogen-fuelled products will be provided a comparative security because their target fuel will have a price stability associated with the major currency, natural gas, rather than a price uncertainty, that would be expected if hydrogen production was dominated by relatively untried new sustainable technologies. Said another way, investors are more likely to be comfortable making commitments to hydrogen-fuelled products if they know the cost of their target fuel (H₂) relative to the cost of a conventional fuel in widespread use.

The ability of SD H₂ to serve the market will depend upon its ability to meet or go below the fossil derived (FD H₂) price - which in practice will mean the SMR H₂ reference price. Sustainable H₂ could be economic in site-specific circumstances. These circumstances can sometimes be even more favourable if appropriate credits are taken for byproducts such as oxygen and, perhaps, heavy water. The rate at which SD H₂ increases its share of the hydrogen market will track the rate at which the cost differential between electricity and conventional fuels moves to favour electricity - particularly, electricity manufactured from sustainable energy sources. At some point, probably beyond 2000, the cost of energy from sustainable sources may be expected to fall significantly below the cost of conventional liquid fuels. Then the reference price for hydrogen will be the price of SD H₂, and the price of hydrogen will move below the cost of conventional fuels.

We can also compare the expected cost of hydrogen with that of liquid fuels.

It is reasonable that the price of natural gas will continue to be no more than about 75% of that of crude oil. Since we said earlier it is unlikely that hydrogen would cost more than twice natural gas, this means that the cost of hydrogen will not be greater than 1.5 times the price of crude oil ($2 \times .75 = 1.5$). Indeed, because we expect that, especially with the best technologies for SMR H₂ production, gaseous H₂ may be no more than 1.6 times the cost of natural gas, this puts hydrogen at 1.2 times the cost of crude oil (e.g. $1.6 \times 0.75 = 1.2$). Since the cost of liquid fuels will always be greater than the price of the crude oil from which they are made, hydrogen cost should be less than 1.2 times the cost of liquid fuels on a per unit energy content basis.

Should the preceding paragraphs leave you with a kind of "how's that again?" feeling, it all comes down to this: if hydrogen were produced, today, in large quantities and with the best technologies, its cost would be about the same as gasoline and other petroleum derived fuels. Hence, the assumption that hydrogen will be more expensive than conventional fuels over the next twenty years may, from this perspective, be conservative.

Enabling Legislation

The price of fuels can be very different from cost. Pricing is an issue tied to public policy and legislation as well as corporate policy. When sold in large quantities - such as for centralized locomotive refuelling or to supply a hydrogen pipeline network - SMR H₂ costs can be

expected to fall much below today's merchant hydrogen prices.

Finally, when the quantities of a commodity like hydrogen begin to impact the commercial life of a nation, the temptation to regulate prices and impose taxes can loom large. Any legislation introduced to deal with hydrogen prices must be treated as *enabling* legislation. Federal and provincial governments should use their legislative power to *encourage* rather than impede hydrogen opportunities.

Impact on Hydrogen-Fuelled Products

The cost of hydrogen compared to the cost of conventional liquid fuels will influence the performance objectives that must be met by hydrogen-fuelled technologies if they are to achieve commercial success. Consistent with the earlier logic that suggests hydrogen will cost in the range of 1.2 times the cost of conventional fuels (and initially could cost much more) hydrogen-fuelled products must perform much better than the conventional-fuelled products they replace. A reasonable target might be at least 50% better since the initial capital cost of the hydrogen-fuelled product would probably be higher and the overall life-cycle cost must be lower.

Technologies *specially* designed to exploit the unique features of hydrogen (e.g. the light weight, environmental benefits, and special suitability for electrochemical energy conversion) typically exceed this performance level.

For example, space vehicles operate so much better on hydrogen than they could on conventional fuels, that landing on the moon would have been delayed[†] by some 20 years and would have cost many times more, if hydrogen had not been available. The emerging designs for hydrogen-fuelled aircraft are expected to be 2-3 times more efficient than conventional fuelled airplanes - and, again, trans-atmospheric vehicles could not even be conceived without hydrogen. Finally, hydrogen fuel cells operate at efficiencies 2-3 times the efficiencies of most internal combustion engines in today's transportation vehicles. Therefore, fuel cell technology, when developed in an appropriate configuration for land vehicle propulsion systems, can be the key enabling technology for the much wider use of hydrogen.

These performance levels indicate that important opportunities will exist for technologies developed to *exploit* the advantages of hydrogen, *not cope* with its limitations. There may be a temptation to retrofit existing technologies to operate on hydrogen. But, since technologies retrofitted to operate on a new fuel seldom operate as well as they do on the fuel they were designed for, these retrofits will rarely achieve commercial success.

For example, a conventional car retrofitted to operate on hydrogen will work - in the sense that it can be driven round the block for the TV cameras. But the retrofitted engine is probably less efficient when using H₂ than when using gasoline. The trunk is filled with an LH₂ tank or weighted down with metal hydrides. The car is more expensive and so is the fuel. It works. But it works by *coping*, not *exploiting*.

Technologies specially developed to *exploit* the properties of neat hydrogen are the opportunity.

[†] While greatly advanced materials were developed which could "make up for" the much higher weight of conventional fuels.

3.2 A NATIONAL MISSION

The Concept of the National Mission

During the course of a nation's history, its people sometimes unite in a common purpose. History gives many examples: Being first in the exploration of space, eradicating malnutrition or illiteracy, achieving victory in war, constructing dikes to keep out the sea, building a railroad to give birth to a nation. These are national missions. National missions are guided by clear, determined leadership, and normally receive broad public support. Most importantly, national missions always, in some way, influence the nation's character and shape its destiny.

Fortunately, Canada is not waging a war, the railroad has been built and, unlike the Netherlands, we need few dikes to keep out the sea. Canada is free to adopt a mission focussing on economic development, environmental benefits, job creation, quality of life improvement, leadership in selected technologies, and R&D. And in taking on such a challenge, we can build national pride and confidence.

The Advisory Group believes that at this time in Canada's development, few things could be more important to our country's future than the establishment of a mission with these benefits. For a mission of this type to succeed, most of the following circumstances should be met:

- Federal political leadership
- Broadly based support from the provinces, industry, labour, environmental groups, academia, and the investor community
- Continuity of political support for at least two decades
- Compatibility with Canada's industrial mix, geography, natural resources, history, research and technical abilities, and self perception
- Compatibility with other countries' perception of Canada, which will aid the development of export markets
- Focus for a wide range of multi-disciplinary R&D activities
- Appeal to the imagination to mobilize the skills and enthusiasm of Canadians

Some of these circumstances are met inherently by a hydrogen mission (like "compatibility with Canada's industrial mix, geography and history"). Other circumstances - like "political leadership" - can only be provided by the elected representatives of Canada's people. (It is not essential that all criteria be met - for example the "perception of Japan held by other countries" thirty years ago does not coincide with Japan's position today as a nation building products of superb quality). Yet it is remarkable that a Canadian hydrogen mission could, with sustained leadership, successfully meet so many of these criteria.

And on the issue of leadership, Canada's elected representatives are in a favoured position to build public support. This should be easy. In the few cases where individual Advisory Group members tested the concept of a national hydrogen mission with broader Canadian audiences, the concept received responses like: "It's just the sort of thing this country really needs."

Why the Hydrogen Opportunity Needs a National Mission

Besides assessing if hydrogen can satisfy the criteria for a national mission, we turned things around to ask the question: can the opportunities that hydrogen provides Canada be captured *without* a mission? We believe the answer is: No!

To provide a focus and continuity for industry, research groups and investors, and to provide a sustained framework for product development and joint ventures to exploit both Canadian and foreign opportunities, a national mission is essential. The reasons are as follows:

- Without a mission, there is no possibility that the Canadian academic community will recognize the importance of directing their R&D to satisfy Canada's hydrogen opportunities. For example, prior to the establishment of AOSTRA, which gives a focus to oil sands development, few Alberta academics were carrying out related research. The creation of AOSTRA offered a focus resulting in a substantial research increase in Albertan and Canadian academic institutions. With a hydrogen focus, the academic community would also be expected, in time, to evolve their curricula to prepare students for future careers. A very special example relates to electrochemistry. Several studies* have addressed the growing importance of electrochemical technologies in applications such as corrosion, chemical processing and energy conversion. Yet Canada's electrochemical efforts have steadily declined since 1945 leaving another strategically dangerous technology gap. A hydrogen mission would be a focus for an even more broadly based thrust to develop electrochemical technologies.
- Today, most resource companies maximize shareholder return by purchasing their technologies from outside the country rather than developing their own. Cost and time frames are the reasons for the acquisition of foreign technologies. In addition, the manufacturing industries supplying technologies are often located in other countries. Canada has resource industries - but very few industries that provide the advanced technologies these resource industries use.
- Most industrialized countries with which Canada competes have developed methods of integrating their investor, government, industrial, labour, and academic constituencies to achieve long-term objectives. Germany and Japan are leaders in this type of multi-year and multi-group coordination for national growth. For Canada to compete internationally, it must become more efficient in integrating these same sectors. This integration avoids duplication, encourages collaborative action, pools economic resources, develops a trained labour corps, promotes joint ventures, and minimizes risk to individual groups. But this commonality of purpose cannot be achieved without a focus. The focus is provided by the mission.
- Without a national hydrogen mission to provide focus, incentive and continuity, the small business community, which should be a major contributor to and beneficiary of Canada's hydrogen opportunity, would lack a framework providing confidence for longer term investments. The small business community must participate because, traditionally, it has been so effective in stimulating innovation and mobilizing creative talents.

* e.g. Whitehead, J.R. and Lapp, P.H., *Study on the Establishment of an Electrochemical Technology Centre*, Feb. 1981.

- A national hydrogen mission will develop those technologies which can build global markets for Canadian products and know-how, such as the design and construction of heavy hydrocarbon projects which integrate natural gas or sustainable energy sources. Building a foreign oil sands or coal development using Canadian upgrading processes that use hydrogen and oxygen from a Canadian electrolysis plant drawing electricity from Canadian hydraulic or nuclear technologies could be a feasible outcome.

In summary, if the full range of opportunities is to be achieved, a national mission devoted to hydrogen is essential. A core of purpose which pervades all sectors of Canada must exist, or the promise of Canada's competitive advantage will evaporate. Canada must seize the opportunity before other countries - with fewer advantages but more foresight and determination - do so.

What the Mission Should Provide

The Government of Canada should take actions and make commitments which will provide:

- Wise and positive leadership which recognizes the significance of the transition to the hydrogen age.
- Confidence and continuity for the business community to invest in hydrogen initiatives.
- Focus and direction for the university and research establishments.
- Education and information to the public.

What the Mission Should Achieve

1. Hydrogen Production, Purification, Distribution and Storage

Canada should develop and *own* the best technologies for the economic *production* of hydrogen from either fossil or sustainable sources, and for hydrogen purification, distribution, and storage.

Canada should ensure it owns technologies which allow Canada to be the world's most effective producer of hydrogen. *Owning* technologies leads to *opportunities* targetted at both domestic and foreign sales. The benefits of developing and thereby *owning* rather than just *using* technologies, is key to all our recommendations. Today, steam reforming of natural gas is usually the cheapest process for large scale hydrogen production. Partial oxidation of fossil fuels and electrolysis of water are other processes. Improving the energy efficiency of steam reforming; reducing the complexity and improving reliability of partial oxidation; reducing the capital cost and broadening the range of acceptable water for water electrolysis; and achieving efficient hydrogen liquefaction, distribution and storage, illustrate technology objectives which should be part of the hydrogen mission. Purification technologies for fossil-derived hydrogen need improvement, especially when the hydrogen will be used in hydrogen-fuelled products like vehicles.

2. Hydrogen Addition to Heavy Fossil and Biomass Sources

Canada should develop and *own* the world's best technologies for *using* hydrogen in the production of liquid fuels and other chemical products from fossil and biomass sources.

For a hydrogen mission to be successful, Canada's scientific and industrial communities must aggressively develop new and more efficient technologies for using hydrogen in the production of conventional fuels and chemical commodities from Canada's enormous but hydrogen-deficient fossil sources. These technologies should be developed primarily for projects using Canadian heavy crudes, bitumen and coal but they should also include biomass options such as wood and peat. These technologies and products should find markets around the world.

3. Integrating Energy Sources

Canada should develop and use the best technologies and most effective industrial interfacing to integrate energy sources whenever appropriate. This domestic experience will allow Canada's engineering-construction industry to seek similar foreign opportunities.

Adding hydrogen obtained from natural gas to heavy fossil sources and biomass is a first step towards the more comprehensive integration of multiple energy sources. The generic advantages to integration can lead to: improved resource utilization; environmental benefits; higher efficiencies; improved capacity utilization; economic benefits; and resilience to external surprises. All energy sectors must be encouraged to develop the means of both technical and business interfacing which will allow Canadians to benefit from source integration soon. Co-processing of coal and oil, and incorporating electrolytic hydrogen and oxygen into heavy oil upgrading are two other integration examples. Special opportunities to mobilize Canada's electricity generation capacity for the production of chemical fuels and commodities should be sought. An electrolysis demonstration plant of appropriate size (perhaps 100 MW) should be constructed, to develop techniques to reduce the cost of water electrolysis and to evaluate technological interfaces with the hydrogen-using industries. Opportunities to export these technologies and design-construction expertise should be sought.

4. Hydrogen-Fuelled Products

Canada should develop and *own* the best technologies, systems, and products for using "neat" hydrogen (high purity hydrogen), especially in hydrogen-fuelled vehicles. Aircraft, locomotives, mining and construction equipment, and special duty-cycle road vehicles may be targets of opportunity.

For a hydrogen mission to be successful, Canada *must* have a program to develop technologies and products that use neat hydrogen. The first step should be to analyze and quantify the comparative advantages of several target products. As an objective, at least two hydrogen-fuelled vehicles should be selected from such options as patrol aircraft, locomotive, fleet road vehicles, and mining, forestry or construction equipment. Selections should be made on criteria of technology development merit and ultimate market potential, and should be developed through to demonstration. On-board hydrogen storage is an essential enabling technology. Although it is premature to select specific targets, our deliberations found three opportunities

with several attractions:

- Hydrogen fuel cell locomotives would provide an excellent platform for technology development, could be a bonus to Canada's locomotive industry, would allow the development of a Canadian fuel cell industry, and show potential for commercial success in Canadian and foreign markets.
- Specialized hydrogen-fuelled urban road vehicles could have unique environmental and duty-cycle advantages, would initiate a hydrogen refuelling infrastructure and is a logical first step into the immense road vehicle market.
- Patrol aircraft fuelled by hydrogen from two strategically located bases would have operational advantages, would enhance Canada's aerospace industry, and could play an important part in Canada's sovereignty and defense capabilities.

The importance of developing hydrogen-fuelled products cannot be overstated. At this time they represent the single key vulnerability in Canada's competitive position.

5. Local Energy-Independent Applications

Although not explicitly identified in the Executive Summary, the use of hydrogen technologies in local energy-independent applications should be mentioned. The importance of these technologies lies not so much in the market potential that they represent, but rather in their potential to improve the quality of life in those parts of Canada (and the world) where fuel and electrical infrastructures do not yet exist or are costly to implement and maintain. In these areas, smaller scale energy sources (solar, wind, small hydro) may be appropriate. The markets will be characterized by technologies in which high efficiency has been traded for lower capital cost and simplicity of operation. These systems will be disconnected from large energy infrastructures and their total energy independence will be an attractive feature. Many small scale energy sources have a severe supply-demand mismatch, which necessitates energy storage. The hydrogen storage option may provide an attractive solution.

Besides having the potential to, in effect, store electrical energy manufactured from local sources, hydrogen can allow these same local energy sources to be used to manufacture a fuel for vehicles like tractors.

3.3 PROGRAM SELECTION

"Breadth of scope rather than depth of detail" was the charge given to the Advisory Group. But without definitive statements on what these opportunities *are*, talking about hydrogen opportunities in the generality can smack of philosophy, fuzziness or abstraction. This section, along with Appendix A.1, illustrates specific hydrogen opportunities by using substantive examples, although individually none of the examples may be implemented exactly as described.

To develop a sense for the opportunities that hydrogen provides Canada, the Advisory Group considered a matrix of projects. This matrix was broadly divided into two categories, **resource integration** and **hydrogen-fuelled products**. We wanted an overview of hydrogen opportunities - to see the forest rather than to examine the trees. But to know what the forest would look like, we had to have sample trees, lakes, boulders and even a few mosquitos. The *real* forest that will develop if our recommendation for a national hydrogen mission is implemented may have some trees of different species, lakes of different shapes, and boulders in different locations. But from a distance the forest should be a lot like what we visualize now.

What we visualize is the subject of the "Sample Program" given in Appendix A.1. Appendix A.1 contains a brief description of projects and three tables which suggest: Program Synergies (Table 2), Selection Criteria and 5-Year Funding Requirements (Table 3), and Target Achievements and Target Dates (Table 4).

Criteria for Program Selection

The Advisory Group used several criteria in selecting the components of a national hydrogen program. While these will be further defined by the Canadian Hydrogen Authority (the recommendation for and role of the CHA are discussed in Section 3.4), the following may be considered as starting points.

Technology Maturity

All proposed projects should be classified for their technological maturity under the categories of embryonic, emerging and established. These categories have been discussed on page 2 of this report. The classification gives one benchmark for government involvement and supplies criteria for when industry should develop markets without government support.

The market share percentage used in defining transitions from embryo to emerging to established is relatively arbitrary. It is the *concept* rather than the percentage which is important. Moreover, it is also difficult to evaluate a fraction of a market when the market may be multifaceted. For example, consider the fuel cell market as a power supplier. In the space shuttle program, fuel cells have 100% of the market, but as a power supplier in general terms, fuel cells have but an infinitesimal fraction of the market. Market share as a classification must therefore be carefully applied.

Economic Benefit Accrual

In certain areas, existing industries can expand their product or service lines to include hydrogen initiatives - and directly benefit from taking these initiatives.

In other areas, no industries exist which could be natural performers. For example, no company in Canada is manufacturing fuel cells, nor is there an obvious industrial candidate which might easily broaden its range of products into this area. The CHA must find mechanisms whereby new industries can be developed or existing industries can supply products not previously manufactured in Canada. A rational procurement program for defence, rail, or even mining equipment may be a mechanism for encouraging the initiation of these new industries.

Finally, in other areas, economic benefits are difficult to pinpoint on specific industry or sector. Benefits from roads, canal systems or geological surveys are dispersed over many individuals. Hydrogen pipelines will benefit the pipeline builder, but also develop an infrastructure allowing many others to profit. Safety codes bring no specific profits to those who develop them, but benefit many by providing clear standards for product development and use - and, of course, by preventing accidents.

Will Industry Develop Technology Anyway

Industries are the best judge of when they must develop new processes and products to maintain their competitive position. Public funds should not support industrial research that the industries will do in any event - especially since existing tax incentives already support corporate R&D. Public funding should be provided to support R&D that industries would not perform without special incentives. Most high technology development - as in aircraft and computers - has followed this general pattern. This is especially true for programs which require a lead time of more than 5-10 years.

Canadian Competitive Position

In some products and processes, Canada may have a clear comparative advantage. In others, a Canadian advantage may emerge because other nations have made errors in their development strategies. Sometimes, Canada may begin with a comparative disadvantage, but this disadvantage could be overcome with a strong effort, and because, with a hydrogen mission, Canada could provide a fertile internal market.

Development Costs

At this time it is impossible to identify total development costs. But it is important to recognize several features of these costs. First, the total cost for a *group* of projects may be *less* than the sum of the costs of the individual projects, because of project synergies. Second, the CHA may choose among the various projects, and decide that some are more promising and eliminate others. Hence, in developing programs by project, category and group for planning purposes, the sum of the projects is always greater than the total for the category and the sum of the categories is greater than the total for the group (Table A3).

Priority:

- "Essential": A national hydrogen program would be incomplete without a substantial effort to develop technologies or products in this classification.
- "Very Important": A national program would be seriously weakened if these projects were absent, but could proceed with a few projects missing in this category.
- "Important": Projects given this classification should be examined for feasibility. A reasonable portion - say towards 50% - should be pursued with vigour.

Several hydrogen opportunities do not fall under this list of priorities. For example, there are opportunities for the manufacture of ammonia, for using byproduct hydrogen from industrial processes, and for selling liquid hydrogen to the Kennedy Space Center. In these cases, the markets are established (hydrogen has captured 100% of both the space shuttle liquid fuel market and the ammonia market). Although these activities should be encouraged, the CHA need not be closely involved with these business ventures. Moreover, the Hydrogen Industry Council is an appropriate vehicle for promoting immediate industrial hydrogen opportunities and can be expected to interface with the CHA when appropriate.

Setting Target Objectives

Target objectives are often set at fixed intervals of time - say, at 5 year intervals for a 5, 10 or 15 year time span. But because a national hydrogen program will be so multifaceted, it may be better if the CHA set objectives by life-cycle phase rather than by specific milestones for the integrated program. That is, the time when a product or process makes transitions from the embryo to emerging or emerging to established phase, a market objective will have been reached. Within these longer term market objective timespans, target milestones and the normal management criteria would apply.

Illustrative National Hydrogen Mission

Appendix A.1 gives shape to what the Advisory Group believes may constitute a valid national hydrogen mission. Readers should recognize the dilemma of the Advisory Group. First, it would be inappropriate to make explicit recommendations for specific projects which could be implemented without further examination. Yet, the Group felt equally strongly that the many substantive projects discussed during deliberations should not be lost. Moreover, these projects can provide a point of departure for the CHA.

3.4 PROVIDING LEADERSHIP: CANADIAN HYDROGEN AUTHORITY

After the Advisory Group came to recognize and recommend that the Canadian hydrogen opportunity merited a national mission, the next question was: how should the mission be managed?

Flowing from a predilection to getting the job done and against increasing bureaucratic structures, the Advisory Group began with strong reservations about proposing any new organizational structure. Yet after much discussion, it was decided to recommend the establishment of a small organization, which we have called a Canadian Hydrogen Authority. This Authority would have a single responsibility: *assuring that Canadians of this and succeeding generations gain the full benefits the hydrogen opportunity promises.*

The recommendation of the Advisory Group that a Canadian Hydrogen Authority be established is based on the following:

- It is essential that mission leadership be provided by an organization whose *sole* duty is the success of the mission. If the organization has other responsibilities, that single purpose would be placed in jeopardy.
- To avoid organizational or financial conflicts of interest, the lead organization must not play a performer role nor represent performer groups. Moreover while close and cooperative relationships by the lead organization with all relevant sectors - labour, industrial, scientific, etc. - is essential, the mission objectives must not be set *only* by the performers.
- The lead organization must identify missing technologies or industries, which, by their absence, constitute a barrier to the assembly of multi-component products or initiatives - or the achievement of national objectives. Industry cannot reasonably be expected to identify these gaps if they fall outside their product lines or business sphere.
- The lead organization must provide dynamic leadership for the mission, linking it directly to the Minister designate.

Characteristics of the Authority

One way to characterize the Authority is that - in the broadest sense - it be a political champion. It must build credibility for itself by the quality of its technical judgment melded with an ability to articulate clearly the issues without undue oversimplification or unwarranted rhetoric. Above all, *it must permit the right decisions to be taken in a timely fashion* and it must link these decisions to broad Canadian objectives. To meet these objectives:

- The Authority must solicit and remain in touch with the views of all relevant Canadian constituencies, including labour, industry, small business, and financial and scientific groups.
- The Authority must be proactive in structuring the national mission, and thereby go beyond just being responsive to industrial and institutional proposals.

- The Authority will provide leadership and certain executive functions. Members should be competent in relevant or in complementary fields, and bring a strong commitment and high energy level to this task.
- The Authority should be small. The Advisory Group recommends a board of approximately five or six members, with not more than two representatives from government, assisted by a small analysis and support team (which might be drawn on short-term secondment from the industrial, business and research communities). If more extensive analysis and modelling expertise is needed, it should be obtained on a contract basis from appropriate performers.
- The Authority should assign comprehensive management of individual projects to others, in particular to the performers. The established management skills of both industry and government agencies should be used whenever possible.
- The Authority should report to the Government of Canada through a Minister Designate. The Authority should also prepare recommendations and alternatives for consideration by Cabinet.

Costs

For an initial five-years period the Authority should receive sufficient funds to cover its own operating costs and for the procurement of small scale R&D from others. We estimate \$50 million for this purpose.

Of course, to capture the full benefits of a national hydrogen mission - expected to yield many billions of dollars in economic benefits *alone* (not including environmental and other benefits) - additional funds commensurate with these objectives will, in time, be required from both the governmental and private sectors. Funding for large scale procurement and demonstration would be in collaboration with the private sector, agencies involved in such activities as defence or transportation, and the provinces.



PART 4: THE BENEFITS

4.1 NATIONAL DISTINCTIVENESS

At the beginning of this report we identified two components of national economic efficiency, "productivity" and a certain measure of "distinctiveness." The importance of productivity is clear. The importance of distinctiveness may be less obvious.

Distinctiveness, in this context, is directly related to a nation's ability to develop unique comparative advantages. Distinctiveness, especially when wisely built on a nation's history, character, and endowment, can greatly strengthen those comparative advantages. Distinctiveness has many inherent benefits - one is that it provides a platform to be first and to be *seen* to be first. For Canada to be first to the hydrogen age means that Canada is first to develop and market important technologies and processes. It means Canada will use its *present* distinctiveness in energy reserves to build a *new* distinctiveness in advanced hydrogen technologies.

It also means Canada will be first to establish "starter niches" for many hydrogen-fuelled products. These technologies will improve rapidly because they are in early life-cycle phases. Then, in response to growing markets, the cost of hydrogen can be expected to drop as the infrastructure develops, to further accelerate the blossoming of these niches. Canada will then be the supplier of choice for products and expertise when other nations wish to gain similar benefits. The strategy is the following:

- Canada can develop a national distinctiveness around hydrogen technologies, built on a unique understanding of how hydrogen will influence the world's future.
- Canada can then use this distinctiveness to position itself to use and market these technologies, and gain the rewards from being first in this world trend.

The rewards are outlined in the next three sections.

4.2 A CLEANER ENVIRONMENT

In the early 1900's, light bulbs displaced coal oil and coal gas lamps for the business of illuminating living rooms. It was not cheaper - only the best homes could afford electric lighting. And we were not running out of coal gas or coal oil. Electricity won because light bulbs were better. And one way they were better is that living rooms became cleaner and homes became safer.

The change from lamps to light bulbs was a *process* change. One result of this process change was a cleaner, safer environment. There are always *two* ways to reduce pollution:

- Change the process to *stop making* the pollutant
- Put a collector in the effluent stream to *catch* the pollutant.

Usually people think of catching the pollutant when they want to "clean the place up." But most often changing the process is better at "cleaning the place up," and also yields a more efficient process. For example, if you have coal oil lamps and want a cleaner living room, it is better to change to light bulbs than to put emission control systems on your lamps.

Using hydrogen instead of a fossil fuel is always a process change. And it always brings environmental benefits. It is often the best way to clean the place up. Sometimes it is the only way.

The environmental benefits of hydrogen are important in four areas: Site-critical environments, urban environments, continental environments, and the world environment.

Site-critical Environments

Hydrogen-fuelled vehicles and machinery give special environmental benefits when used in closed spaces such as mines, warehouses, factories, and sports complexes. Diesel or gasoline machinery is now often used in these locations. This requires costly ventilation systems and often the air is still not very clean. Hydrogen-fuelled ice scraping/flooding equipment for skating arenas and hydrogen-fuelled mining vehicles are but two sample technologies that would improve air quality in site-critical settings.

Urban Environments

It is common for the most severe urban pollution to come from vehicles. For this reason urban air quality can be improved by the degree to which hydrogen-fuelled vehicles are introduced. The use of hydrogen vehicles cannot be significant before the turn of the century. However, later they can bring about a renaissance in urban environments. Before hydrogen vehicles are used, transitional vehicles using high hydrogen/carbon fuels like propane and methane will give some benefit. Hydrogen can also reduce undesirable emissions from urban industries. For example, using hydrogen rather than coke as a reducing agent in making steel can profoundly improve air quality in steel-making cities.

Continental Environments

The emission of compounds which produce *acid rain* have a detrimental impact on a continental-wide basis. Acid rain is increasingly recognized as an important cause of *economic* as well as environmental damage. The use of "captive" hydrogen within industrial processes already plays a large role in reducing acid rain producing emissions. For example, hydrogen has a key role in removing sulphur from petrochemical feedstocks. In the future, as hydrogen becomes the major fuel and is a pervasive commodity in processing industries, most acid rain can be eliminated. Nitrous oxides which do contribute to acid rain can be a byproduct of any high temperature combustion in air. Hydrogen combustion is no different. But even in this example it has been shown by Lockheed and Daimler Benz that the broad flammability range of hydrogen-air combustion allows engines to be operated with greatly reduced NO_x emissions.

World Environment

Perhaps the most time-critical environmental challenge facing our planet is the accelerating increase in atmospheric CO₂. While the benefits of hydrogen for site-critical, urban and continental environments could also be described in detail, the Advisory Group decided to focus on the global environment, not just because of the importance of atmospheric CO₂, but also as a means of demonstrating general features of hydrogen's environmental benefits - most of which apply in all settings.

The growing CO₂ level in the atmosphere is an environmental danger *without precedent*. Commonly called the greenhouse effect, its long term impact is most often expressed in terms of a planetary warming. Yet it is the impact on the world's regional climatic structure that poses the greatest threat over the next few decades. As one example of regional climate changes, decreases in available soil water and runoff are projected for much of central North America - causing an acceleration of land desertification and in the longer term lower water levels in the Great Lakes. In turn, this could interfere with navigation and severely disrupt North American agriculture - an industry already under much stress.⁺

The growth in CO₂ is attributed, primarily, to the use of fossil energy sources. But because plant life eats atmospheric CO₂ as its source of carbon, one effect of worldwide deforestation is to slow the *removal* of CO₂ from the atmosphere. Deforestation, therefore, aggravates the CO₂ increase caused by using fossil energy sources. Moreover, the increased atmospheric levels of several other industrial process gases also add, cumulatively, to the greenhouse effect.

The phrase "environmental danger without precedent" was not chosen casually. Climatic warming could become *irreversible* early in the next century. It is this irreversibility which distinguishes CO₂ from other environmental pollutants - like acid rains or carcinogenic smoke. We can always stop the acid rain or smoke by turning off the emitters. The greenhouse effect is different because, once the world has moved past certain thresholds, even precipitous (and impractical) correction strategies like the immediate halt to all fossil sourced

⁺ The CO₂ induced climatic shift will adversely impact existing infrastructure *well within the economic life-time of these installations*. As just one example, it has been estimated that several hundred million dollars per year of hydro electricity production will be lost due to reduced run-off.

CO₂ emissions, may be insufficient to reverse continued warming. One such threshold might be the melting of the floating ice at the North Pole, because the earth's albedo (the fraction of incident sunlight reflected back to space) would be reduced.

A central recommendation of the Advisory Group is to encourage the development of energy systems which integrate several energy sources. One benefit of integration is the conservation of carbon and a parallel lowering of CO₂ emissions. This results from using hydrogen addition rather than carbon rejection processes. To illustrate how the choice of process and integration scheme can lower atmospheric CO₂ emission, three operations, each of which would produce 735 TJ/d (about 120,000 bbls/day) of synthetic crude from oil sands, were evaluated to determine the tonnage of daily CO₂ emitted to the atmosphere.⁺ The results are as follows:

Case 1: Coal as external fuel - upgrading by thermal cracking

Commodity	TJ/d	t/d
Coal (input)	305	20,300
Raw bitumen (input)	915	22,400
Synthetic crude (output)	735	17,000†
CO ₂ emission (output)	-	44,600

Case 2: Natural gas as external fuel - upgrading by hydrocracking

Commodity	TJ/d	t/d
Natural gas (input)	293	5,450
Raw bitumen (input)	825	20,200
Synthetic crude (output)	735	17,200†
CO ₂ emission (output)	-	20,900

Case 3: Electricity and nuclear steam external energy sources - upgrading by hydrocracking

Commodity	TJ/d	t/d
Steam and electricity (input)	130(s) 112(e)	-
Raw bitumen (input)	825	20,200
Synthetic crude (output)	735	17,200†
CO ₂ emission (output)	-	6,400

TJ/d: Terrajoules per day (1 TJ $\approx$ 3 million kw.hr $\approx$ 160 bbls of oil)

t/d: Tons per day (1 ton = 2000 lbm)

†The different tonnage of synthetic crude for the same energy content results from a slightly different chemical composition of the products.

⁺ This work was initially presented in a paper "Alberta Oil Sands Development-Integration Opportunities" by E.J. Wiggins presented at the Energy Opportunities Conference held in Edmonton in April 1982, under the sponsorship of the Alberta Oil Sands Technology and Research Authority and the Institute for Hydrogen Systems. The data presented here are a refinement on those earlier estimates and were passed on to the Advisory Group by Dr. Wiggins in a personal communication.

In Case 1, the CO₂ dumped to the atmosphere is almost three times the tonnage of the intended product, synthetic crude.

In case 2, the CO₂ tonnage is still more than the syncrude tonnage, although it is less than half that of Case 1.

In Case 3, the CO₂ tonnage falls to only a little more than one-third of the syncrude tonnage. Case 3 uses *both* the *hydrogen* from electrolysis, as well as the *oxygen* to make additional hydrogen by partial oxidation (POX).

In principle, the byproduct atmospheric emission of CO₂ *could essentially be reduced to zero* if all the hydrogen added came directly from electrolysis and by converting the pitch, light ends, and off-gases to liquids and burning electrolytic hydrogen in any fuel-fired heaters. The byproduct oxygen could then be dumped to the atmosphere or used in a different industrial process.

One more thing about the greenhouse effect is important. Climate is a fluctuating phenomenon. For example, if a region of the world experiences a dryer monsoon season than normal, it is difficult to know if this is a fluctuation - a one year fluke - or part of a long term climatic evolution.

Today's scientific consensus is that long term climatic changes, consistent with greenhouse effect predictions, are being measured *above* normal climatic fluctuations. This means that if a climatic fluctuation which caused two or three years of relative drought came on top of a general trend to lower regional rainfall caused by CO₂, the result could be the death by starvation of millions. Some predict the chances are about even of this happening in some regions of the world before the turn of the century. In the shock of this catastrophe, people will come to realize that because the drought was aggravated by increasing CO₂, subsequent droughts will occur *more often* and subsequent droughts could be *worse*. This could be the stuff of world wide political action.

In Summary

Hydrogen will make our world cleaner. Cities will enjoy bluer skies. Forests and lakes will be protected from acid rains. Working environments and recreation complexes can be cleaner. In the case of the greenhouse effect, hydrogen does not just clean things up, it is the only practical way to avert what might become a global calamity.

4.3 INDUSTRIAL GROWTH AND JOB CREATION

One theme of this report is that in planning for the future, we never know everything but seldom know nothing. The things we know now about our hydrogen future can be used to economic advantage. In this spirit we say the following.

Governments always have one good reason for not taking initiatives. Initiatives cost money. But for some initiatives - those which will bring long term national wealth - it is necessary to spend money first to make much more money later. The question then becomes: What is the national return on national investment?

The reason we recommend a national hydrogen mission is our belief that the return on this hydrogen investment will be enormous. Compared to the wealth which will be created, little money needs to be spent today, primarily because most hydrogen technologies are in the early phases of their life cycles. But the high payback also results because the mission will be built on an industrial evolution that is already occurring. The mission investment is the marginal cost of leading rather than following. The national return is high because, through the hydrogen mission, we will be doing many things that should be done anyway - like improving our transportation sector, strengthening our resource sector, and protecting the environment.

Above all, the high payback will result from "positioning." One objective of the hydrogen mission will be to position Canada, in the minds of other nations, as the leader in hydrogen. All paybacks increase if we are seen as first.

Canadians know of the impediment placed upon national growth by national debt. One way to reduce this debt is to reduce spending. Another way is to create more wealth. A hydrogen mission will create a lot of wealth for relatively little spending. It is an important investment in Canada's future.

Job Creation

A nation must have and use the best technologies if it is to maintain international competitiveness, thereby in turn maintaining and expanding its job pool. A national hydrogen mission will develop technologies and create new jobs in almost all sectors, including the resource industries, electricity generation and distribution and, perhaps most important, new manufacturing industries.

The introduction of new technologies sometimes creates localized job disruption. Although this disruption may not be significant compared to the longer term benefits, it is of vital importance to any individual whose livelihood is placed in jeopardy. We recommend that the Canadian Hydrogen Authority work closely with organized labour to assure that while the hydrogen mission is developed very few job dislocations are caused along the way.

A national hydrogen mission is expected to create jobs - jobs which provide long-term stability and high quality working environments. A national hydrogen mission will not be able to prevent the loss of jobs in industries which are already declining, but where it is practical many of the new jobs could be aimed at the communities hardest hit by declining industries.

Utilization of Hydrocarbon Resources

A national hydrogen mission would enhance the effective use of the nation's hydrocarbon resources, in particular, the Athabasca oil sands. The technologies used to process these reserves would contain a much higher Canadian content, and the *flexibility* of processes used in the manufacture of synthetic crudes would be improved. Flexibility would come in two forms: - first, integrated or multiple input/output energy systems can have flexible responses to supply-side or product-side surprises, - second, by the flexibility of greater technical options for processing. This flexibility may be viewed as *business interruption insurance* sheltering Canadian production against political, environmental, or technological surprises.

It is also possible that geo-political events might isolate North America from foreign oil imports. Under these circumstances, if Canada had in place indigenous technologies to manufacture large quantities of synthetic crudes from oil sands reserves, we could establish a strong export market in the United States. Moreover, these energy reserves can be harvested effectively and may be useful in broader trade negotiations.

Utilization of Electricity Generation Capacity

Canada can potentially manufacture enormous quantities of electricity. In many provinces all the potential hydraulic power has not yet been harnessed, because the regional demand for electricity is too low. In other areas, like Ontario, where few undeveloped hydraulic opportunities remain, CANDU generating plants have been or are being constructed. But again the demand for electricity has not kept pace with increasing generation capacity. Today, this generation capacity is locked into providing a single energy currency - electricity.

A hydrogen mission could move forward the date when this generation capacity could also begin to enter the chemistry market. Hydraulic projects in northern Quebec, Labrador, northern Manitoba, and elsewhere could be beneficiaries. Ontario, by integrating its growing CANDU nuclear capacity with its substantial industrial base - perhaps by building hydrogen pipelines modelled on the Huls infrastructure in the Ruhr Valley, could greatly increase the benefits from its CANDU stations.

Exports of Technologies and Engineering-Construction Expertise

Based on domestic experience, Canada could export its project engineering-construction industry expertise to countries wishing to develop heavy oil projects. For example, Canada could help Venezuela develop its sizeable oil sands deposits. These reserves have many features in common with the Athabasca deposits. With a hydrogen mission leading to the development of Canadian processes, and the experience of integrating non-fossil derived hydrogen (Venezuela has almost no natural gas but does have large hydraulic reserves adjacent to its heavy oil), Canadian technology exports to Venezuela could be substantial.

Brazil has very large hydraulic reserves at Itaipu. But Itaipu is in a remote part of Brazil, away from population or industrial centres. The hydraulic energy could manufacture hydrogen to be then shipped by pipeline or rail to other parts of Brazil. The hydrogen could be used in integrated resource opportunities to produce methanol from biomass, thereby increasing the yield from biomass severalfold over today's way of producing ethanol.

Hydrogen Exports

In the longer term, hydrogen manufactured from traditional electricity energy sources could become a worldwide commodity. If Canada develops the technologies and expertise, opportunities may exist for moving hydrogen, for example, from the East Coast to Europe or from the West Coast to the Pacific Rim by tanker. It could be shipped to the United States by pipeline.

Similarly, the vast hydraulic capacity of countries like Zaire can, through hydrogen technologies, develop a global market. Thus, if Canada developed the technologies for hydrogen production, liquefaction, shipping, and storage, Canada could not only export its own electricity in the form of hydrogen, but also manufacture the equipment to ship other countries' hydrogen around the world.

Regional Development

A hydrogen mission will encourage regional development. The mission must not be weakened or impeded by imposing regional constraints, but regional development can be certainly enhanced. First, every province and territory has unique features which could both contribute to and gain from this hydrogen opportunity. Second, components of a hydrogen mission which are not site-specific could be located to contribute to regional development programs. A few examples grow out of hydraulic reserves in Labrador and Baie James, possible use of Cape Breton coal for synfuels, and British Columbia coastal hydraulic. Wherever possible, the hydrogen mission should be used to strengthen the regional economies in areas hit by the decline of existing industries.

Maintenance of Established Technological Sectors

A hydrogen mission can place a firmer foundation under both the heavy oil and hydraulic sectors. The Canadian nuclear and hydraulic industry could also benefit. An important component of a national mission should be to explore ways to adapt our electricity generation technologies to the production of chemical fuels and feedstocks - either in recovering heavy oil in regions lacking natural gas, or in the direct production of hydrogen. The Canadian nuclear and hydraulic industry could make an important contribution to a hydrogen mission.

Today, when Canada markets CANDU abroad, it competes with other nations selling reactors designed for the same market - that is, the making of electricity. CANDU is one of the world's finest reactors. Still, the competition is fierce. If an aggressive program were carried out to adapt CANDU for chemistry, in ten years it could be the *only* conventional nuclear technology in the world specifically adapted for that purpose. After the turn of the century the high temperature reactors of Germany and others may provide competition. But there is always a clear advantage to being first.

4.4 RESEARCH AND DEVELOPMENT

Canada may have the weakest research and development *culture* of any industrialized nation. Of course there have been notable Canadian R&D successes bringing special credit to those who achieve them, but on balance, Canada trails the pack. Perhaps it has been too easy for Canadians to live well from what grows on the land and what they dig out from under it. A plethora of signs - from the fact that most nations of the world can now feed themselves (so that exporting nations enter price slashing wars) to rising import duties on forest products, to falling world prices for minerals like copper, nickel and potash - indicate it will not be easy to live well *just* from "growing and digging" any more. Our only real hope is technological innovation.

There is no lack of rhetoric. Throne speeches and after-dinner-talks are sprinkled with fervent statements on the importance of R&D and technological innovation to Canada's future. Each incoming government has its prescription for how Canada or a province will become a "world class" leader in technologies. There are even some good attempts. But gilded carriages become pumpkins as research tax credit schemes transfer into tax flips. Continuity and long term objectives are the lifeblood of good technology development. Too often the initiatives of one government get thrown out as a new government introduces its own vision of how to boost Canadian R&D and the way R&D supports the economy.

Part of the difficulty may be "structural." Canada lacks a *focus* for the nation's research and development efforts. Some nations, like the United States, have national objectives like the conquest of space or defence. Others, like Japan, have the objective of economic survival (they do not have the ground to grow things on or to dig things out from under). Still others, like Germany or France, have more balanced industrialized mixes where research, development, and product innovation have been a central feature of their economic growth. And lest we be tempted to fall back on the old excuse - we don't have the market size - we might look to Sweden which has a population about the same as the province of Ontario, and compare Sweden's balance of trade in high technology with Canada's. With the closing or retrenching of industrial laboratories and publicly supported research and development institutes, Canada's R&D efforts have, in fact, *declined* over the past two decades.

A national task or objective which required *strengthening* the country's R&D abilities could be of *enormous* benefit to reversing this trend. It would not be a panacea - for it takes a long time and many steps to turn around something which grows out of a cultural emphasis. But it could be a *key* first step. And the benefits would *not measured in dollars alone*.

A Canadian hydrogen mission aimed to *capture* a unique *opportunity* would provide a focus for national R&D efforts. All disciplines in the physical sciences - engineering, physics, and chemistry - could make useful contributions. In addition, a focussed R&D program can use the best and the brightest minds trained at Canada's universities and laboratories, stopping either the "brain drain" of those leaving Canada, or the "brain waste" of those who settle for less.

Research tax credits, new industrial-university research funding programs, or brave announcements of the importance of R&D to the national well-being will only yield results if there is something to *do*. A national hydrogen mission requiring a multidisciplinary, integrated R&D effort can provide that *something to do*.



PART 5: SOME LAST THOUGHTS

Energy vs Technology

From the beginning of this report when we talked about locomotives, we have emphasized competition. Understanding who, or what, is really doing the competing is very important. There is one more way to think about competition that can put our recommendations in context.

Since the beginning of the Industrial Revolution, and particularly since the oil embargo of the early 1970's, the world has seen a direct head-to-head, competition between *technology* and *energy*. Technology has been winning. Energy has been losing.

Take some simple examples. First, cars. Over the last decade we could either have used about the same amount of energy in the technically crude automobiles similar to those of the early 70's, or we could have improved the automobile technologies to use less energy. We know what has happened. Cars have become "better" and use less energy. Technology has won. Energy has lost. In home building, the technologies of better insulation and more efficient furnaces have reduced the amount of energy needed to heat and cool our homes. The same for aircraft. And the same for light bulbs. In all cases technology is winning, energy is losing.

So, when planning a national strategy, does it make sense to market energy or to market technology? Do we want our business to be the sale of energy or the sale of energy technologies?

This is just another way of looking at our recommendations. Our recommendations are for an industrial renaissance based upon emerging technologies. That these technologies have a common thread called hydrogen is because there is no better descriptor. Central to our recommendations is the conviction: *We will win if we use our energy as a platform to develop technologies, not if we buy other people's technologies to develop our energy.*

This is why it is so important that we use our oil sands as a platform to develop heavy oil processing technologies and that we market not just oil, but these technologies, to the world. Conversely, to buy other nations' technologies to harvest our oil sands just for their energy is to back the loser and give others *our* platform which they can use to back the winner.

Alternate Futures: A Win Either Way

There are many reasons why Canada should adopt hydrogen as a national mission. They include environmental benefits, better use of resources, the development of innovation-intensive industries, and the fact that all are in phase with the evolution of energy use in developed nations. But to put these assertions in perspective, let us assume two extreme scenarios that yield different routes to the future:

In the first scenario we prolong the fossil age indefinitely, setting aside concerns for depletion, the greenhouse effect and other environmental impacts. Assume that for the foreseeable future, the world will run on coal, oil, and natural gas, with no further introduction of non-fossil energy. In such a world, these fossil resources would have to be used *very* effectively. This would force the use of improved technologies to more effectively produce clean liquid fuels from heavy oils, and perhaps coal, using hydrogen from natural gas.

In this "fossil fuels forever" world, Canada would benefit from having previously mounted a national mission that brought world leadership in the production of liquid fuels from our extensive mix of fossil reserves - with hydrogen playing the key role in extending these

resources. Moreover, driven by a special demand for efficient, clean, safe, and user-friendly technologies, new hydrogen-fueled products will emerge from "starter niches" (in applications like aerospace) to more widespread use in transportation and other applications. The existence of these products will provide natural gas, normally the best source of FD H₂, with a special opportunity to enter new markets.

The second scenario has a different extreme. Assume world geopolitics becomes driven by concern for catastrophic global climatic changes caused by atmospheric CO₂ from the combustion of fossil fuels. The world must wean itself from fossil fuels as quickly as possible - and during that weaning emit the minimum CO₂ to the environment. Simultaneously the world must develop non-fossil sources of hydrogen and, most importantly, a full matrix of new hydrogen-fuelled products. Again, Canada would benefit from having previously established a national hydrogen mission, which built on its non-fossil electricity generation capacity and used natural gas to make hydrogen for manufacturing transition liquid fuels and for servicing the emerging H₂-fuel products.

The Advisory Group anticipates a more orderly evolution - somewhere between these two extremes. But by examining these two extremes - both in their own way highly improbable - it is clear that by adopting a national hydrogen mission Canada would be uniquely positioned to achieve major benefits whatever future unfolds.

We expect that while depletion will not literally cause the barrel to run dry, lower accessibility and lower quality fossil reserves will inevitably result in rising costs for conventional fuels. Moreover, there is mounting evidence that global warming caused by CO₂ emissions has already occurred, will accelerate, and will yield significant pressures to reduce these emissions. Finally, we believe there is no evidence that the world's *rate* of technological evolution is slowing - indeed it seems to be speeding up.

Canada will gain much from a national hydrogen mission. But it will require continuity of both purpose and political will - built upon a *consistent* approach to capturing the opportunity. A Canadian hydrogen mission will allow us to integrate our resources effectively, and simultaneously to develop hydrogen-fuelled products. This will be done not because a catastrophe has forced change, but because the benefits are so attractive.

Back to Energy Sources

The Advisory Group emphasized a 10 to 20 year time frame. For this reason, we primarily considered energy sources important today. In Canada, these include coal, oil, gas, hydraulic and nuclear fission. Hydrogen will play an important role in the future of each of these energy sources.

In the longer term, new sources may emerge as strong contributors on either a regional or global basis. For example, nuclear fusion could become important. But since it will probably take 50 years to develop fusion, it will likely be committed to the large scale production of hydrogen. Regionally there may be opportunities for geothermal, tides, or wind. Should any of these sources be successful their usefulness will be greatly enhanced when they are used to manufacture hydrogen.

Whichever new sources win, hydrogen becomes the sure bet. And this leads naturally to:

One Last Look at Competition

Examining the nature of competition can clarify what is really happening. But knowing where no competition exists can also be informative. Hydrogen, because it is an energy *currency* *does not compete* directly with energy *sources*. For example, hydrogen does not compete with solar energy. It is an ally of solar energy as the following logic demonstrates.

Today, solar energy can be used for space heating - keeping buildings warm in the winter and swimming pools warm in the summer. Although expensive, solar energy can also produce electricity - but only when the sun shines.⁺ Like all electricity, solar-generated electricity cannot be stored and so this severely restricts the use of solar energy for electricity production. But through hydrogen, solar energy *can* be stored as a fuel. This provides solar with many new markets. For example, hydrogen will allow solar energy to be used to fly an airplane. That is a long way off, but it emphasizes that the energy source, solar, and the energy currency, hydrogen, do not compete. They are allies.

We can say the same for hydrogen when compared with tides, winds, nuclear fusion, or even biomass. It might seem strange to say that hydrogen can be an ally to biomass - but biomass if used to manufacture liquid fuels is hydrogen-deficient. For example, the production of ethanol from biomass by fermentation is very energy inefficient and rejects carbon dioxide. Adding hydrogen to biomass sources can significantly increase the yield of liquid fuels.

Hydrogen never competes with energy sources. One way or another it can always aid them to be used more effectively or to enter new markets. It allows for the more effective use of fossil fuels and biomass in making liquid fuels. And it will allow sustainable "non-material" energy sources (like hydraulic, sunlight, wind, or nuclear fission and fusion) to fuel vehicles.

Hydrogen is best viewed as a commodity which will allow free competition between energy sources. For without hydrogen, there would be no way that sunlight could compete with oil to fly airplanes.

Finally

We need hydrogen now. We especially need hydrogen technologies now. We will need both the hydrogen and the technologies more in whatever future unfolds. Hesitancy could be our only enemy. Our ally, of course, is action.

⁺ Here we refer to the *direct* use of solar by technologies such as photovoltaics. Solar energy, of course, lifts water to clouds which then rain onto lakes and rivers, which in turn allows hydraulic energy to generate electricity. Solar energy is also used to grow trees. So when we burn wood, or ancient wood like coal, we are really using stored solar energy. But clearly, when the public thinks of solar energy it does not think of coal - and neither do we.

APPENDIX 1: SAMPLE PROGRAM DETAILS

The Statement of Work describing the Advisory Group's tasks asked for "breadth of scope rather than depth of detail" - to describe the forest rather than the trees. Therefore, it was inappropriate to develop a complete, integrated project plan for implementing the national mission. Yet any forest is made up of trees, and many trees in the form of valuable ideas and concepts emerged during deliberations. Rather than lose these ideas, a list of possible projects, some definitions and descriptions are included in this Appendix. These projects may provide a point of departure for the proposed Canadian Hydrogen Authority.

The activities are divided into two main groups: **Resource Integration** (group R), and **Hydrogen Fuelled Products** (group P). There are further subcategories in each group as shown in Table A.1. Table A.2 illustrates that an integrated mission can be more effective than a patchwork approach because of the synergies involved with various hydrogen technologies. Table A.3 is a compilation of status and cost benefit information for each sample project. Table A.4 gives target timetables and target accomplishments for representative projects only.

RESOURCE INTEGRATION (GROUP R): Enabling Technologies (Category R-E)

The activities in this category are technologies and products which, if mature, would increase flexibility and opportunities in resource integration. Enabling technologies either provide a connection between two existing technologies, or they extend markets for existing technologies. Of course most of these technologies, R-E-1, 2, 3, 4, 5 and 7, also support the Hydrogen-Fuelled Products group.

R-E-1 Steam Methane Reforming and Hydrogen Purification

Steam methane reforming (SMR) is expected to dominate the production of hydrogen for at least three decades and be important for more than fifty years. Since SMR will be a key process in integrated resource systems, it is appropriate that government encourage the further development of this process even though it is now in the established phase of its lifecycle. Improving the energy efficiency of steam reforming by reducing the amount of excess steam now used by industry is an example of the kind of process improvement which should be sought. Improved metallurgy for heat exchangers and other process improvements would represent a further significant technical advance. Catalysts that are more tolerant to contaminants such as sulphur would find ready industrial acceptance.

A number of hydrogen-fuelled products will require high purity hydrogen. For example, only high purity hydrogen can be liquefied and LH_2 will likely dominate the hydrogen transportation market. Moreover, some of the best performing fuel cells require high purity hydrogen. Government supported R&D in hydrogen purification technologies would remove some impediments to the penetration of SMR H_2 into the transportation sector. Membrane gas separation should be examined, possibly in collaboration with the Alberta Research Council and other organizations.

R-E-2 Non-fossil Hydrogen Production

The importance of continuing efforts to improve the efficiency and flexibility, and to lower capital and operating costs of electrolytic hydrogen production technologies, is clear. Because electrolysis is inherently modular, scale-up uncertainties are reduced. Nevertheless, the ability to scale-up to hundreds or thousands of MW's will have to be demonstrated before electrolysis finds widespread use in resource integration.

In addition to oxygen, byproducts from electrolysis can include D₂O (deuterium oxide, commonly called heavy water). The processes for recovering D₂O, and for improved handling of the O₂, should be included in the electrolysis development program. A Canadian technology for heavy-water recovery during electrolysis looks promising.

In time, thermochemical and hybrid electrothermochemical cycles may begin to be used for NFD H₂ production. These technologies received much attention in Europe more than a decade ago but, compared with electrolysis, they require much further development. Thermochemical or electrothermochemical cycles may become important production methods about the turn of the century. These developments should be monitored. Germany's approach to hydrogen production through direct splitting and reassembly of methane and water, using high-temperature, gas-cooled reactors should also be carefully monitored. It is expected that countries like Germany may be interested in collaboration in these development programs, but probably only if Canada made the sort of commitment indicated by a hydrogen mission. Canada should also consider supporting some small-scale, new and experimental approaches to NFD H₂ production.

R-E-3 Liquefaction and Compression

Liquefaction and compression are technologies in their "established" phase. But like SMR, they should be improved under a national hydrogen mission. Conventional technologies have achieved relatively small fractions of the efficiencies allowed by thermodynamic limits. Potential "breakthrough" technologies are being researched. One example is magnetocaloric liquefaction/refrigeration. These activities should be monitored and a Canadian program established at the appropriate time.

R-E-4 Distribution and Storage

International groups have performed much research and evaluation on hydrogen distribution and storage. This work was done with both long term in-place distribution systems (e.g. West Germany's hydrogen pipeline), and with test-to-fail experiments (e.g. Gas Research Institute, Chicago). The best way for Canada to develop its capability in these areas may be to develop inter-institutional co-operation with foreign organizations.

Project P-E-6 on materials research can make important contributions to distribution and storage.

R-E-5 CANDU and Hydraulic Opportunities

The nuclear industry should be invited to suggest a program to examine the most effective ways the CANDU technology can be optimized for the chemical market. Some organic coolant work that could be applied to raising steam with sufficient temperature and pressure

for use in in-situ oil sand recovery and a technology for producing byproduct heavy water from the electrolysis process, represent contributions that have been initiated. These might form a starting point for a more current evaluation of CANDU as an appropriate technology within a national hydrogen mission.

One specific opportunity that could apply to both nuclear and hydraulic opportunities is that of producing DC electricity, directly, without an intermediate AC step. This could improve the efficiency of DC electricity production by up to 5% *and* reduce capital cost for dedicated hydrogen production. Alternatively, by a slight increase in capital cost, these units could interrupt their DC current for electrolytic hydrogen, to produce "peak shaving" AC for the electricity grid.

R-E-6 Processing Heavy Hydrocarbons Using H₂, O₂, and Heat

The Advisory Group recommends that the CHA work in conjunction with AOSTRA to define appropriate activities. One important area would be to evaluate the nation's ability to integrate fossil and non-fossil energy sources in the production of chemical fuels and feedstocks. Other organizations responsible for the development of coal and heavy oil technology in other provinces should be included in the network.

The CHA should carefully monitor foreign research, especially the West German plans to use syngas (H₂ and CO) made from the systems that integrate natural gas and high-temperature nuclear reactors.

R-E-7 Technologies Appropriate for Regional and Local Energy Sources

These activities may include using East Coast tidal power for the production of hydrogen, and low head hydraulic in other regions, including small communities and individual users. These technologies for small-user settings must be designed for low capital cost. In addition, other sources, such as wind or biomass may play a role. These small scale projects may also be adaptable to Third World needs.

R-E-8 Hydrogen Technologies for the Metallurgical Industry

Considerable potential exists to utilize hydrogen in the reduction of metal ores. The CHA should work with the metallurgical industry to identify appropriate activities.

RESOURCE INTEGRATION: Pilot Scale Evaluations (Category R-P)

Pilot scale evaluations which extend beyond the demonstration of a single technology are essential. In addition to evaluating component technologies against certain performance criteria, the technological *interface* with other system components and the effect on the business sector (institutional interfaces) must be assessed.

R-P-1 On-Site: Oil sands

AOSTRA has suggested building a pilot scale 60 MW electrolysis plant at one of its oil sand locations. The electrolyzer would provide about 10% of the hydrogen required for the upgrader plant. Since the electrolyzer would be experimental, SMR H₂ capacity would be sized at 100% so that production interruptions would not be caused by new technology glitches in the electrolysis plant. The pilot evaluation might be broadened to include the use of byproduct electrolytic oxygen in a partial oxidation process (POX) to produce additional hydrogen.

R-P-2 On-Site: Refinery

Advantages may be gained from locating a 5,000 bbls/day pilot upgrading project in an existing refinery complex. On site expertise, equipment and environmental systems would facilitate regulatory approval and expedite the project. Synergies gained from integrating energy systems at refineries should be evaluated. The CANMET hydrocracking process at Petro Canada in Montreal is one example.

R-P-3 On-Site: CANDU

The evaluation's thrust will be to learn the difficulties and advantages that could come from large-scale liquid fuel production from heavy hydrocarbons when the processing plant is located adjacent to a nuclear generation facility. Possible sites include Bruce Nuclear Energy Park and the new operations at Darlington. Several paper studies have already calculated advantages and costs of projects ranging from 5,000 bbls/day (pilot scale) to a 44,000 bbls/day full scale upgrader. Byproducts can include medium quality process steam, demineralized water, and CO₂ for use in greenhouses.

H₂-FUELLED PRODUCTS (GROUP P): Enabling Technologies (Category P-E)

Enabling technologies either provide a connection between two existing technologies, or they extend markets for existing technologies. In the H₂-fuelled products area, enabling technologies are the key components to the success of many end-use products. For example, special duty-cycle urban vehicles may need such enabling technologies as hydrogen storage, fuel cells, deep-discharge batteries, power controllers and electric drive motors in addition to a good braking system and suspension.

P-E-1 Fuel Cells

Fuel cells are a key technology that will come into full bloom in the hydrogen age (see Section 2.2). Without the fuel cell many end-use technologies, especially in the transportation sector, will not be able to emerge. Several types of fuel cells are under development, but most of these continue to focus on fossil fuels.

The U.S. terrestrial fuel cell program faced a choice more than a decade ago - to develop a new high temperature fuel cell (phosphoric acid) which could run on impure hydrogen, or develop hydrogen purification systems and utilize the best fuel cells of today (alkaline). The

Americans chose the phosphoric acid fuel cell which some now believe was a \$250 million error.

Alkaline fuel cells which have been used successfully in the U.S. space program are much too expensive for commercial use. Siemens in Germany has developed a less expensive hydrogen/oxygen fuel cell, but the system must include an oxygen storage and handling subsystem which add complexity, weight and capital cost. The Netherlands-Belgium consortium Elenco has built an air breathing alkaline hydrogen fuel cell, but its design may have been limited by the choice of a monopolar electrode configuration.

Based on this look at other fuel cell research, the Advisory Group recommends that the alkaline electrolyte fuel cell may present Canada with a strong opportunity to enter this market. Alkaline cells appear to have the best chance for the highest efficiencies, lowest material costs, and most straightforward engineering. This type of cell (probably using a bipolar configuration) could integrate the latest advances in conductive plastics, and move away from noble metal electrocatalysts. In addition, Canada could combine the electrochemistry of alkaline cells with American engineering experience in building large phosphoric acid fuel cells, thereby accelerating the development of large systems. Finally, since alkaline electrolytes are used in Canadian electrolysis, alkaline fuel cell R&D could provide synergies with Canada's electrolysis program. Since alkaline fuel cells require a high purity hydrogen input, they will require a parallel effort on hydrogen purification technologies before they realize their full potential.

A second generic fuel cell type - the ion-exchange membrane (IEM) technologies - should also be investigated. Most IEM cells have been developed to use acidic membrane electrolytes. The membrane cells offer the most elegant packaging of the common fuel cells but still require a carbon monoxide and sulphur free hydrogen input stream. Membrane cells currently require high noble metal catalyst loadings and hence have a high capital cost. An intensive R&D program might reduce many of these limitations.

P-E-2 Heat Engines

The Advisory Group does not recommend that reciprocating internal combustion engines be retrofitted to hydrogen use. Since technologies retrofitted to operate on a new fuel rarely operate as well as on the fuel they were designed for, only rarely will these retrofits achieve commercial success.

On the other hand, hydrogen gas turbines for aircraft will almost certainly yield significant performance improvements. Since the capital required would be too high for Canada to bear alone, developing these heat engines for hydrogen-fuelled aircraft could only be undertaken by a multi-national corporation (such as Pratt and Whitney) as part of a bilateral Canada-US agreement.

There may also be opportunities for hydrogen/oxygen turbines, possibly with a noble gas diluent. These could be coupled with an electrolysis plant and used for load leveling.

P-E-3 On-board Storage and Refuelling for Liquid Hydrogen (LH₂)

The greatest single impediment to the use of hydrogen in the transportation sector may be on-board storage. LH₂ will certainly be the winning candidate in many applications. Through international agreements, favourable circumstances may exist for developing composite

material cryogen tanks for storing LH₂. These tanks, although targetted at LH₂, may have other commercial applications. Refuelling technologies could also be developed in co-operation with American and German concerns.

P-E-4 On-board Storage and Refuelling for Non-Liquid Hydrogen (non-LH₂)

As we have just noted, the technical demands of on-board storage may be the greatest barrier to the use of hydrogen in transportation. For this reason the Advisory Group recommends strategic appraisal of other means of hydrogen storage, including metal hydrides, to assure that no opportunity has been overlooked. Some of these storage alternatives may be useful in settings where additional weight is unimportant, or when smaller quantities of hydrogen must be stored for long time periods.

P-E-5 Storage Batteries for Hybrid Powertrains

Most storage battery development has concentrated on overcoming what is seen to be the major impediment of batteries - the low energy density (kilowatt-hour/kilogram). If storage batteries are the sole power source for a vehicle, this low energy density adversely affects the range between recharges. The typically slow recharge time of storage batteries is also a problem in many vehicular applications.

Alternatively, an electric vehicle can be powered by storing the energy in the form of hydrogen, and using fuel cells to convert the hydrogen to electricity. The kilowatt-hour/kilogram ratio then becomes constrained only by the incremental weight of additional hydrogen storage, and range is restricted only by the capacity of the hydrogen storage tank.

However, the limitation of fuel cells is power density (kilowatts/kilogram), not energy density. A vehicle powered solely by fuel cells may have acceptable range and refuelling time but may be underpowered. The fuel cell limitations exactly complement the storage battery limitations. Therefore, by creating a hybrid - combining fuel cell and hydrogen tank to achieve the appropriate energy density, with storage batteries to meet power density demands during acceleration - the limitations of each technology can be overcome.

Few battery manufacturers have recognized this opportunity, and hence few have worked intensively on deep-discharge, high-power, lower-capacity batteries. Several electrochemical configurations are possible, and may provide a significant opportunity for the Canadian storage battery industry.

P-E-6 Materials Development

It is often said that there are no technological problems, only materials problems. Certainly the development of improved materials will play a major role in the rate in which new hydrogen technologies may be introduced.

Hydrogen compatibility (e.g., hydrogen embrittlement) has already received much attention in Canada, as it was the phenomenon which caused failures in the CANDU reactor tubes. AECL and Ontario Hydro have made in-depth studies of hydrogen-metal interactions under extreme conditions. These groups and others could form the nucleus for a significant hydrogen materials program.

P-E-7 Safety and Handling: Codes and Standards

Codes must be developed in anticipation of emerging industrial and commercial trends. NRCC has already begun this process, and groups in the U.S. and Germany could be helpful collaborators in writing comprehensive code manuals.

H₂-FUELLED PRODUCTS:

Sovereignty-Defence Applications (Category P-D)

Sovereignty/defence products are targetted at a different national mission than the one proposed in this report. Yet, many products developed for defence are eventually adapted to civilian use. One example might be the development of hydrogen helicopters, which could contribute to the growth and further exploration of Canada's northern territories.

P-D-1 Monitoring and Communications in Isolated Locations

For the North Warning System, fuel cells supplied with airlifted LH₂ should be evaluated for their potential as a potential electricity source. Similar opportunities may exist for aids-to-navigation, and for remote monitoring and communications equipment. Since fuel cells used in this manner may have commercial applications, plans should be made in cooperation with telecommunications companies.

P-D-2 Space Platform

If Canada participates in a multinational program to build space platforms, it should seek out a role in hydrogen storage/delivery and fuel cell technologies. One strategy could be to adapt terrestrial development programs to space research, since this approach should significantly reduce costs as space activities move further towards commercial applications.

P-D-3 Submersibles

The performance envelopes of battery-powered and nuclear-powered submersibles leave an important gap which can be filled by fuel cell submersibles. Besides their defence applications, fuel cell submersibles could have a significant market in scientific research, and in seabed exploration and mining on Canada's large continental shelf areas.

P-D-4 Patrol/Survey Helicopters

Hydrogen-fuelled helicopters, because of their increased range, time on station or lift, can be useful in many settings, and may be important in developing the Canadian North. There is little doubt that a hydrogen-fuelled helicopter developed for defence could find broader commercial application as the infrastructure for hydrogen refuelling grows.

P-D-5 Patrol/Survey Fixed-Wing Aircraft

Hydrogen-fuelled fixed-wing aircraft have analogous advantages to hydrogen-fuelled helicopters. Using hydrogen can increase range and time on station, thereby reducing the need for refuelling, and allowing for fewer, longer lasting patrol missions. Other aircraft applications for hydrogen technologies should be evaluated.

H₂-FUELLED PRODUCTS: Commercial Vehicles (Category P-V)

The national hydrogen program *must* develop terrestrial vehicles which operate on hydrogen.

P-V-1 Site-Critical Vehicles

There are at least two reasons why using hydrogen at specific sites can be useful and cost effective - because of environmental benefits, or because conventional fuels are more expensive.

One study, performed in cooperation with a mining equipment manufacturer, has investigated the development of hydrogen-fuelled mining vehicles. This is one of the best near term hydrogen vehicle applications. The market, however, is small. This may also be one instance where a retrofitted internal combustion engine could be used. In a mine, the higher cost of hydrogen could be offset by lowered costs for maintaining air quality. Similar applications and environmental demands/benefits might exist for ice flooding equipment in arenas, tunneling equipment, open-pit digging and construction vehicles, and heavy moving equipment in warehouses.

Potential markets exist for hydrogen-fuelled vehicles in isolated settings. For example, during its construction phase, the Baie James hydroelectric project used diesel vehicles whose fuel supply was airlifted. In such settings, it may be more cost effective to produce hydrogen locally than to fly in conventional fuels.

P-V-2 Special Duty-Cycle Urban Vehicles

One example may be "splicing vans" used by telecommunications companies such as Bell Canada. These vehicles have two functions: to provide ground transportation for workers and to provide electrical power for repairs and maintenance in locations without grid supply, like manholes. Presently, a utility vehicle uses a conventional IC engine for propulsion and a motor generator unit for electrical power. One potential application may be to develop a hybrid fuel cell/battery operated electric vehicle which can efficiently fulfill both functions. The battery supplements propulsion power for acceleration, while the fuel cell provides the power for electricity needs. While stationary, the fuel cell recharges the batteries.

P-V-3 Locomotives

With respect to national energy priorities, hydrogen-fuelled locomotives can be viewed in two contexts. First, they may represent a technology which allows the most economic route for

natural gas to enter the railway market - the cost of the natural gas to hydrogen step may be more than offset by the much greater suitability of hydrogen for fuel cells and, in turn, the much greater efficiency of fuel cells than diesel engines. Second, hydrogen locomotives may be viewed as an alternate way to "electrify" the railroads, if this is taken to mean "use the nation's electricity generation capacity to pull trains." We must remember there are two ways to "electrify" railroads: through direct electrification using a third rail or catenary, or through indirect electrification using electrolytic hydrogen, preferably in fuel cells. The Advisory Group recommends that the CHA seriously consider the indirect electrification option and build a prototype fuel cell locomotive. Fuel cell locomotives have a number of advantages over direct electrification.

- By operating on hydrogen which can be manufactured from our electricity generation capacity, it is possible for this capacity to power railways.
- In this sense, by indirect electrification, the fuel cell locomotive avoids the high capital cost of overhead catenary or third rail installation.
- The fuel cell locomotive avoids the visual pollution of overhead catenaries.
- The fuel cell locomotive avoids the breakdown of catenaries from ice weight and of third rails from snow buildup.
- The fuel cell locomotive provides transportation to and in remote areas where direct electrification would be exceedingly costly. This ensures that every mile of track can be indirectly "electrified".
- In the commutersheds of large cities, the fuel cell locomotive does not add to the peak electricity loads during rush hours.
- *By using hydrogen fuel cells, the technology provides the additional options that natural gas sources H_2 may be used whenever appropriate. Moreover, this may represent the most economic way for natural gas to penetrate the rail market.*

Several analyses of the fuel cell locomotive opportunity have been performed and can provide a point of departure for future development.

P-V-4 Great Lakes Ships and Submarine Tankers

Megawatt fuel cells in ships can offer energy use efficiencies, reliability of energy supply, and long range between refuelling. It is unlikely, however, that this size fuel cell will be built unless it is useful in other large applications.

Bringing down hydrocarbons from the north underneath the polar icepack by submarine tanker presents a remarkable array of synergies, and should be on the list of projects to be examined.

OTHER CATEGORIES:

P-O-1 Local Energy-Independent Applications

These have been described as item 5 at the end of Section 3.2.

TABLE A1 THE TWO PROGRAM GROUPS

RESOURCE INTEGRATION (GROUP R)		H₂-FUELLED PRODUCTS (GROUP P)	
Enabling Technologies (Category R-E)		Enabling Technologies (Category P-E)	
R-E-1	Steam Methane Reforming & Hydrogen Purification	P-E-1	Fuel Cells
R-E-2	Non-Fossil Hydrogen Production	P-E-2	Heat Engines
R-E-3	Liquefaction & Compression	P-E-3	On-board Storage & Refuelling (LH ₂)
R-E-4	Distribution & Storage	P-E-4	On-board Storage & Refuelling (non-LH ₂)
R-E-5	CANDU & Hydraulic Opportunities	P-E-5	Storage Batteries for Hybrid Power Trains
R-E-6	Hydrogen, Oxygen & Heat Processing	P-E-6	Hydrogen-Compatible Materials Development
R-E-7	Local Energy Source Technologies	P-E-7	Safety & Handling, Codes and Standards
R-E-8	Hydrogen Technologies for Metallurgy		
Pilot Scale Evaluations (Category R-P)		Defence/Sovereignty Applications (Category P-D)	
R-P-1	On-Site: Oil Sands	P-D-1	Remote Location Sensing & Communications
R-P-2	On-Site: Refinery	P-D-2	Space Platform
R-P-3	On-Site: CANDU	P-D-3	Submersibles
		P-D-4	Patrol/Survey Helicopters
		P-D-5	Patrol/Survey Fixed-Wing Aircraft
		Commercial Vehicles (Category P-V)	
		P-V-1	Site-Critical Vehicles (e.g. Mining)
		P-V-2	Special Duty-Cycle Urban Vehicles
		P-V-3	Locomotives
		P-V-4	Great Lakes Ships & Submarine Tankers
		Other (Category P-O)	
		P-O-1	Local Energy-Independent Applications

TABLE A2 TYPICAL PROGRAM SYNERGIES

LEGEND

● Essential ○ Helpful

NEED THESE
TECHNOLOGIES
AND/OR PRODUCTS

TO DEVELOP THESE
TECHNOLOGIES
AND/OR PRODUCTS

	LEGEND			
	● Essential	○ Helpful		
NEED THESE TECHNOLOGIES AND/OR PRODUCTS	➔			
TO DEVELOP THESE TECHNOLOGIES AND/OR PRODUCTS	➔			
	R-E-1	Steam Methane Reforming & Hydrogen Purification		
	R-E-2	Non-Fossil Hydrogen Production		
	R-E-3	Liquefaction & Compression		
	R-E-4	Distribution & Storage		
	R-E-5	CANDU & Hydraulic Opportunities		
	R-E-6	Hydrogen, Oxygen & Heat Processing		
	R-E-7	Local Energy Source Technologies		
	R-E-8	Hydrogen Technologies for Metallurgy		
	R-P-1	On-Site Oil Sands		
	R-P-2	On-Site Refinery		
	R-P-3	On-Site CANDU		
	P-E-1	Fuel Cells		
	P-E-2	Heat Engines		
	P-E-3	On-board Storage & Refuelling (LH ₂)		
	P-E-4	On-board Storage & Refuelling (non-LH ₂)		
	P-E-5	Storage Batteries for Hybrid Power Trains		
	P-E-6	Hydrogen-Compatible Materials Development		
	P-E-7	Safety & Handling Codes and Standards		
	P-D-1	Remote Location Sensing & Communications		
	P-D-2	Space Platform		
	P-D-3	Submersibles		
	P-D-4	Patrol/Survey Helicopters		
	P-D-5	Patrol/Survey Fixed-Wing Aircraft		
	P-V-1	Site-Critical Vehicles (e.g. Mining)		
	P-V-2	Special Duty-Cycle Urban Vehicles		
	P-V-3	Locomotives		
	P-V-4	Great Lakes Ships & Submarine Tankers		
	P-O-1	Local Energy-Independent Applications		
Steam Methane Reforming & Purification	●		○	○
Non-Fossil Hydrogen Production		●	○	○
Liquefaction & Compression		○	●	
Distribution & Storage		○	○	●
CANDU & Hydraulic Opportunities			●	●
Hydrogen, Oxygen & Heat Processing		○	●	○
Local Energy Source Technologies			●	○
Hydrogen Technologies for Metallurgy			●	
On-Site: Oil Sands		○	○	○
On-Site: Refinery		○	○	○
On-Site: CANDU		○	●	○
Fuel Cells		○	○	
Heat Engines				
On-board Storage & Refuelling (LH ₂)			●	●
On-board Storage & Refuelling (non-LH ₂)			○	●
Storage Batteries for Hybrid Power Trains				
Hydrogen-Compatible Materials Development				
Safety & Handling Codes and Standards				
Remote Location Sensing & Communications		○	○	○
Space Platform				
Submersibles				
Patrol/Survey Helicopters		○	○	○
Patrol/Survey Fixed-Wing Aircraft		○	○	○
Site-Critical Vehicles (e.g. Mining)		○	○	○
Special Duty-Cycle Urban Vehicles		○	○	○
Locomotives		○	○	○
Great Lakes Ships & Submarine Tankers		○	○	○
Local Energy-Independent Applications		●	●	●

TABLE A3 TYPICAL SELECTION CRITERIA AND FUNDING REQUIREMENTS

PROGRAM ACTIVITIES	TECHNOLOGY MATURITY Embryonic 1-3 Emerging 4-7 Established 8-10	ECONOMIC BENEFIT ACCRUES TO Existing Industry (E) New Industry (N) Dispersed (D)	WILL INDUSTRY DEVELOP ANYWAY Yes (Y) With Gov't Subsidy (S) No (N)	CANADIAN COMPETITIVE POSITION Excellent 10 Neutral 5 Very Poor 0	TOTAL COSTS \$ Million Cdn. over 5 years As Isolated Projects	GOVT PORTION	CATEGORY SYNERGIES Gov't Expenditures As Part Of Integrated Mission	GROUP SYNERGIES	PRIORITY Essential 1 Very Important 2 Important 3
RESOURCE INTEGRATION (GROUP R)							140	120	
Enabling Technologies (Category R-E)						51.2	40		1
R-E-1 Steam Methane Reforming & Hydrogen Purification	8	E	Y	5	10	6			2
R-E-2 Non-Fossil Hydrogen Production	2	E	S	7	15	12			1
R-E-3 Liquefaction & Compression	6	E(N)	N	4	7	5.6			2
R-E-4 Distribution & Storage	4	E(N)	N	4	7	5.6			2
R-E-5 CANDU & Hydraulic Opportunities	3	E	N	7	10	10			2
R-E-6 Hydrogen, Oxygen & Heat Processing	4	E	S	7	10	6			1
R-E-7 Local Energy Source Technologies	1	E	N	5	2.5	2			3
R-E-8 Hydrogen Technologies for Metallurgy	6	E	Y	6	5	4			3
Pilot Scale Evaluations (Category R-P)					200	132	100		1
R-P-1 On-Site: Oil Sands	4	E(N)	N	8	50	33			2
R-P-2 On-Site: Refinery	5	E	S	5	50	33			3
R-P-3 On-Site: CANDU	4	E(N)	N	8	100	66			3
H₂-FUELLED PRODUCTS (GROUP P)							82	70	
Enabling Technologies (Category P-E)						37.5	30		1
P-E-1 Fuel Cells	2	N(E)	N	3	25	20			1
P-E-2 Heat Engines	2	E	N	3	5	4			3
P-E-3 On-board Storage & Refuelling (LH ₂)	4	N	N	3	7.5	6			1
P-E-4 On-board Storage & Refuelling (non-LH ₂)	3	N	N	3	2.5	2			1
P-E-5 Storage Batteries for Hybrid Power Trains	6	E(N)	S	4	2.5	2			3
P-E-6 Hydrogen-Compatible Materials Development	—	D	—	—	2.5	2			1
P-E-7 Safety & Handling: Codes and Standards	7	D	N	—	1.5	1.5			2
Defence/Sovereignty Applications (Category P-D)						37.5	25		1
P-D-1 Remote Location Sensing & Communications	1	N	N	6	10	10			3
P-D-2 Space Platform	6	N(E)	N	4	2.5	2.5			3
P-D-3 Submersibles	1	N	N	5	5	5			3
P-D-4 Patrol/Survey Helicopters	2	E(N)	N	5	10	10			3
P-D-5 Patrol/Survey Fixed-Wing Aircraft	2	E(N)	N	3(7)	10	10			3
Commercial Vehicles (Category P-V)						30.4	25		1
P-V-1 Site-Critical Vehicles (e.g. Mining)	1	E(N)	N	5	10	8			2
P-V-2 Special Duty-Cycle Urban Vehicles	1	N(E)	N(S)	6	10	8			2
P-V-3 Locomotives	1	N(E)	N(S)	7	15	12			2
P-V-4 Great Lakes Ships & Submarine Tankers	1	N	N	6	3	2.4			3
Other (Category P-O)									
P-O-1 Local Energy-Independent Applications	1	N	N	6	3	2.5	2		2

TABLE A4 EXAMPLE: TARGET ACHIEVEMENTS AND TARGET DATES

PROGRAM ACTIVITIES	TOWARDS THE EMBRYO-EMERGING TRANSITION TARGET ACHIEVEMENTS
RESOURCE INTEGRATION (GROUP R)	
Enabling Technologies (Category R-E)	
R-E-1 Steam Methane Reforming & Hydrogen Purification	
R-E-2 Non-Fossil Hydrogen Production	----- 600 MW installed electrolysis plant -----
R-E-3 Liquefaction & Compression	
R-E-4 Distribution & Storage	
R-E-5 CANDU & Hydraulic Opportunities	
R-E-6 Hydrogen, Oxygen & Heat Processing	
R-E-7 Local Energy Source Technologies	
R-E-8 Hydrogen Technologies for Metallurgy	
Pilot Scale Evaluations (Category R-P)	Two Projects Operational (1 Eastern, 1 Western Canada)
R-P-1 On-Site: Oil Sands	
R-P-2 On-Site: Refinery	
R-P-3 On-Site: CANDU	
H₂-FUELLED PRODUCTS (GROUP P)	
Enabling Technologies (Category P-E)	
P-E-1 Fuel Cells	--- Two 2MW plants operational (made up from 300 kW modules) ---
P-E-2 Heat Engines	
P-E-3 On-board Storage & Refuelling (LH ₂)	
P-E-4 On-board Storage & Refuelling (non-LH ₂)	
P-E-5 Storage Batteries for Hybrid Power Trains	
P-E-6 Hydrogen-Compatible Materials Development	
P-E-7 Safety & Handling Codes and Standards	
Defence/Sovereignty Applications (Category P-D)	Two or Three Prototypes Operational
P-D-1 Remote Location Sensing & Communications	
P-D-2 Space Platform	
P-D-3 Submersibles	
P-D-4 Patrol/Survey Helicopters	}
P-D-5 Patrol/Survey Fixed-Wing Aircraft	}
Commercial Vehicles (Category P-V)	
P-V-1 Site-Critical Vehicles (e.g. Mining)	
P-V-2 Special Duty-Cycle Urban Vehicles	--- 6 "Mark II" Prototypes ---
P-V-3 Locomotives	--- 3 Fuel-Cell Locomotive Prototypes ---
Other (Category P-O)	
P-O-1 Local Energy-Independent Applications	

DATES	TOWARDS THE EMERGING-ESTABLISHED TRANSITION TARGET ACHIEVEMENTS	DATES
----- 1996	----- 10% efficiency improvement achieved in 10 GW capacity phase, and export of Canadian technology -----	2002
	----- 1600 MW installed capacity for chemical market -----	2002
1994		
----- 1994		
1997	Two or three Applications in Use	2002
	----- 1 or 2 Applications in Use -----	2002
----- 1991	----- 6% of Canadian self-fuelled mining fleet using H ₂ -----	1999
----- 1996	----- Production 18 locomotives/y (12 domestic, 6 foreign sales) -----	2006

APPENDIX 2: HYDROGEN SAFETY

Hydrogen is a very good fuel - it burns easily, cleanly and contains a lot of energy for its weight. Any good fuel must be properly handled or hazardous combustion could result.

Much is already known about safe hydrogen handling practices. NASA has made extensive studies and developed comprehensive guidelines to ensure that LH₂, used to fuel its space vehicles, can be safely handled in large quantities. As a result, they have never had a hydrogen fuelling accident resulting in death. In fact, this extensive experience base has allowed cryogenic tankers carrying LH₂ to routinely ply our railways and roadways today with an excellent safety record. Large quantities of gaseous hydrogen are routinely handled in refinery and petrochemical plants worldwide. The Germans have demonstrated that hydrogen can safely be transported by pipeline, and have 50 years of experience doing just that. Gaseous hydrogen is routinely transported by road to batch service electronics and food processing industries.

Still, any new use of hydrogen or any new technology to utilize hydrogen must be designed to ensure that no violations of established safety practices occur. Thus, any national mission to develop hydrogen technologies must include as an integral part an ongoing safety study. As more experience is gained, the hydrogen safety database must be updated. Canada has already made a start in this direction through the recent NRCC Hydrogen Safety Committee. This work should be expanded as part of the proposed national mission.

Hydrogen is a fuel very different from the more commonly used liquid hydrocarbon fuels. As such, it has safety aspects which demand more care, and aspects where less care is tolerated. On balance, with proper knowledge and procedures, experience has shown that hydrogen is probably less dangerous than any of our common fuels.

APPENDIX 3: ABIOGENIC NATURAL GAS

Some scientists now argue that the primeval source of the world's fossil fuels is not necessarily *solely* biogenic. That is, fossil fuels do not *only* come from dead dinosaurs, their friends, and things they ate. This body of opinion, identified with Professor Gold of Cornell University, argues that methane is a primordial molecule of the universe and can probably be found in large quantities in the bowels of the earth. If this is so, methane may have been outgassing over the centuries, in part to polymerize during its upward flow in conjunction with biological hydrocarbon sources thereby contributing to the formation of solid and liquid deposits.

The world's first gas well being drilled specifically to seek abiogenic natural gas (through non-sedimentary rock) has, at the time of writing of this report, passed 2,000 meter depth at the rim of the Siljan crater in Sweden. Under a cap rock expected at the 5,000 meter level, a substantive reservoir of natural gas might be found which, by its location, would almost certainly have to be abiogenic in origin. In general, opinions about the drilling range from cautious optimism to outright skepticism. Whatever the outcome, the results will hold considerable interest for the experience of drilling through granite, and adding important information on the geology of our planet.

If large quantities of abiogenic natural gas are found at depths of 5,000 meters or greater, this may be important in regions of the world where conventional gas is in short supply. Today's drilling technologies would, however, make deep gas very expensive to recover, although the presence of deep gas might be a driving force to improve these technologies. Even if abiogenic gas becomes a contributor to the world energy market, it would be several decades before it had a significant impact. Abiogenic gas would likely be absorbed in the immense need for natural gas, both for use in its traditional mode (cooking, space heating and industrial processes) and as a source of hydrogen for fossil resource integration and hydrogen-fuelled products.

APPENDIX 4: ENERGY CURRENCIES

An energy currency may be viewed as analogous to fiscal currency. A fiscal currency allows fiscal transactions but is not, itself, a source of wealth. An energy currency allows energy transactions, is not a source of energy, but *is* often the determining factor in whether a source *can* be harvested, and how. The terms "primary source" and "secondary source" are sometimes used where we use "source" and "currency." In part, our preference lies in the fact that both "source" and "currency" are used as nouns preceded by "energy" used as an adjective† – reinforcing the essential differences between the two. Using "primary" and "secondary" as adjectives to the noun "energy" suggests they are much the same thing, or worse, have the same function.

Among other terms, energy "carrier" is also used where we have used energy "currency". A "currency" seems to imply a deeper concept than that of "carrier" - not only because our "stuff" must be stored as well as carried, but also from the implication that the *nature* of the currency defines the *nature of the energy transactions which may be accomplished by using that currency*. Example can put backbone in abstraction and we can illustrate this last important concept of energy currencies (that their nature constrains their uses) by noting that: it is very difficult to fly an airplane on the energy currency electricity; and it is very difficult to run a computer on the energy currency turbo fuel.

The phrase "energy vector" has also been used. It may have an excitement value, but likely no other.

† A grammatical horror to some, but in common usage as we speak of things like an "energy crises"

APPENDIX 5: CONSULTATIONS AND RESOURCE PERSONS

During our investigations, the Advisory Group consulted with organizations and individuals having an interest in and knowledge of energy systems and hydrogen. Organizations and individuals contacted include:

1. The Hydrogen Industry Council

An Advisory Group subcommittee met with the Hydrogen Industry Council in Montreal in the Fall of 1985. The Council was invited to submit a brief providing background information on hydrogen activities in Canada and the world, as well as offer specific suggestions for hydrogen opportunities in Canada. The Council provided the Advisory Group with useful reports on its activities. The Advisory Group Chairman also visited Montreal in March to present a brief overview of the Committee's deliberations and to solicit further suggestions. Finally, a meeting was held with the President of the Council, Mr. Richard Champagne, who provided valuable examples of Canadian opportunities, on October 8, 1986.

2. The Alberta Oil Sands Technology and Research Authority (AOSTRA)

An Advisory Group subcommittee met with the AOSTRA Chairman and several board members in Banff in December, 1985. AOSTRA was invited to make specific suggestions on hydrogen opportunities in Canada. AOSTRA responded with a series of concepts which were studied by the Advisory Group. In March, the Advisory Group Chairman visited AOSTRA to clarify and further explore aspects of AOSTRA's suggestions. One member of the AOSTRA Board, Dr. Ernie Wiggins, provided continuing advice as the Advisory Group developed its understanding of the oil sands opportunities.

3. The Canadian Institute for Advanced Research

An Advisory Group subcommittee met with Drs. Mustard and Ham of the Canadian Institute for Advanced Research, to discuss the hydrogen mission as it relates to Canadian involvement in aerospace.

4. Federal Ministries

During the Fall of 1985, Advisory Group subcommittees met with representatives of Energy Mines and Resources; Transport Canada; Industry Trade and Commerce; Ministry of State for Science and Technology; and Environment Canada. In addition, during the course of its deliberations the Advisory Group Chairman maintained contact with staff of EM&R, Ministry of the Environment, and MOSST.

5. Dr. J. Bryan Taylor, Director of Business Development, Moly Energy Corporation, Vancouver

In March, the Chairman of the Advisory Group visited Dr. Taylor. Dr. Taylor previously headed the Federal Hydrogen Program managed by the National Research Council of Canada. Dr. Taylor offered many helpful suggestions both on establishing a national hydrogen mission, and its organizational/managerial format.

6. Provincial Governments

The Advisory Group sent letters inviting comments on any aspect of the Group's mandate to relevant provincial Ministries. The following Ministries responded:

Alberta

Ministry of Technology, Research and Telecommunications
Ministry of Transportation
Ministry of Environment
Ministry of Agriculture
Ministry of Energy and Natural Resources
Ministry of Economic Development

British Columbia

Ministry of Industry and Small Business Development
Ministry of Environment

Manitoba

Ministry of Highways and Transportation
Ministry of Energy and Mines
Ministry of Agriculture
Ministry of Environment and Workplace Safety and Health
Ministry of Industry, Trade and Technology

Newfoundland & Labrador

Department of Environment

Prince Edward Island

Department of Agriculture
Department of Energy and Forestry

Ontario

Ministry of Agriculture and Food
Ministry of Energy

Québec

Ministère des Transports, responsable du développement régional
Ministère de l'Industrie et du Commerce
Ministère de l'Environnement

Saskatchewan

Province of Saskatchewan Premier's Office
Ministry of Science and Technology
Ministry of Environment
Ministry of Rural Development
Ministry of Highways and Transportation
Ministry of Parks and Renewable Resources

7. Resource Persons Attending Advisory Group Meetings

The three persons invited to add their specific expertise and experience to the Advisory Group deliberations were:

- **Mr. Ben Ball, President of the International Consortium on Integrated Energy Systems, Massachusetts Institute of Technology**

Formerly Vice-President for Strategic Planning at Gulf International, Mr. Ball discussed the use of hydrogen to integrate sustainable and exhaustible energy sources in the production of liquid fuels. He also described the structural barriers that can inhibit collaboration between industries from these sectors.

- **Mr. Willis Hawkins, Senior Advisor, Lockheed Corporation**

Mr. Hawkins, retired Corporate Senior Vice-President for Science and Engineering of Lockheed Corporation, described the broad use of neat hydrogen in hydrogen-fuelled vehicles with an emphasis on aerospace applications. He also provided views on how the Government can support and encourage the growth of innovation-intensive industries and products.

- **Dr. Kenneth Hare, Provost, Trinity College of the University of Toronto**

Dr. Hare is the former President of the University of British Columbia and presently Chairman of the Climate Program Planning Board of Canada, and President of Sigma Xi. He presented the latest thinking on the environmental impact of national and international energy use, with a special emphasis on the effects of increased carbon-dioxide levels in the atmosphere.

L'HYDROGÈNE

UNE MISSION NATIONALE POUR LE CANADA

Rapport du Comité consultatif des perspectives de l'hydrogène
Juin 1987

Préparé pour : le ministère d'État chargé des Sciences et de la Technologie
le ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources
Gouvernement du Canada, 33^e Législature

Juin 1987

L'honorable Frank Oberle
Ministre d'État chargé des Sciences et de la Technologie

L'honorable Marcel Masse
Ministre de l'Énergie, des Mines et des Ressources

Messieurs les Ministres,

Au nom du Comité consultatif des perspectives de l'hydrogène, mandaté par vos ministères en septembre 1985, j'ai l'honneur de vous présenter notre rapport intitulé "L'hydrogène, une mission nationale pour le Canada".

Le Comité consultatif souhaite que ce rapport vous soit utile et qu'il serve les intérêts du Canada.

Veuillez agréer, Messieurs les Ministres, l'assurance de ma très haute considération.

Le président,
Comité consultatif des
perspectives de l'hydrogène,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "David S. Scott", with a long horizontal flourish extending to the right.

David S. Scott

À PROPOS DE MISSION NATIONALE...

Il est facile de se déclarer souverain. Pour exercer cette souveraineté, cependant, il faut en avoir le pouvoir économique. Ces deux éléments sont en effet indissociables car, pour affirmer son caractère national, un peuple doit avoir les moyens de s'autodéterminer.

Or, son rendement économique se mesurera à l'aune de sa productivité et, jusque dans une certaine mesure, de son caractère distinct. Si, depuis quelque temps, il réussit parfois à sortir des rangs, le Canada fait rarement preuve de la discipline et de la détermination qui lui permettraient d'exploiter commercialement et culturellement sa différence.

Pour se donner une mission nationale, le pays doit se fixer des objectifs réalistes qui, une fois atteints, le doteront d'un caractère distinct dont il pourra profiter commercialement. La volonté nationale ne saurait, à elle seule, être garante de succès; d'autres pays formulent de semblables vœux et ont souvent manifesté une détermination plus grande. Le Canada doit repérer les techniques prometteuses à l'échelon mondial, développer de nouvelles compétences et se préparer à assumer les risques nécessaires pour réussir.

Le présent rapport est consacré aux créneaux que pourrait se tailler le Canada s'il décidait de "franchir, le premier, le seuil de l'hydrogène". Cette expression est en fait le thème du document. Le Comité consultatif des perspectives de l'hydrogène est d'avis que cette énergie offre au Canada l'occasion rêvée de s'imposer dans un domaine technologique. Le pays a certes d'excellentes chances, actuellement, et des avantages marqués. Cette option lui permettrait de se distinguer sur le plan technique, à un moment où les besoins en matière d'innovation technologique se font de plus en plus pressants.

MEMBRES DU COMITÉ CONSULTATIF DES PERSPECTIVES DE L'HYDROGÈNE

David Scott, président

*Professeur de génie mécanique, Université de Toronto
Directeur fondateur, Institut des systèmes à hydrogène*

Lionel Boulet, vice-président

*Président du conseil d'administration, Lalonde, Girouard, Letendre et associés Ltée, Montréal
Président fondateur, Institut de recherche d'Hydro-Québec*

Gordon Gilchrist, secrétaire

*Propriétaire, Canadian Tire, Scarborough
Ancien député et critique en matière de science et de technologie*

Carl Beigie

*Directeur et économiste principal, Dominion Securities, Inc., Toronto
Directeur fondateur de l'Institut C.D. Howe*

Clement Bowman

*Vice-président, Pétroles Esso Canada, Sarnia
Président fondateur, Bureau de la recherche et de la technologie sur les sables bitumineux de l'Alberta*

Réal L'Archevêque

Vice-président, Le Groupe S.N.C., Montréal

John Masters

Président, Canadian Hunter, Calgary

George Pon

Vice-président, Énergie atomique du Canada Ltée, Ottawa

Alexander Stuart

*Président, Electrolyser Inc., Etobicoke
Président, Comité directeur sur l'hydrogène, Agence internationale de l'énergie*

SOMMAIRE DE LA DIRECTION

Au lendemain de la Deuxième Guerre mondiale, la locomotive Diesel rivalisait avec la locomotive à vapeur, en Amérique du Nord; le diesel l'a emporté. Cette concurrence marquait plus un tournant technologique qu'un choix entre le charbon et le mazout. La victoire du diesel a néanmoins décidé du sort du combustible puisque le mazout a supplanté le charbon.

De la même façon, le présent rapport porte sur l'hydrogène. Au-delà des guerres de combustibles, il traite surtout des techniques qui donneront une tête d'avance au Canada et qui le placeront aux portes du XXI^e siècle.

UNE OCCASION UNIQUE

Le monde se dirige progressivement vers une utilisation accrue de l'hydrogène, et le Canada pourrait s'imposer comme chef de file dans ce domaine. L'hydrogène connaît déjà de nombreux usages. Au Canada, il est surtout utilisé, depuis quelque temps, pour améliorer la quantité et la qualité des produits pétroliers dérivés des bruts lourds et du bitume. La forte demande canadienne, alliée aux importantes réserves de gaz naturel, source d'hydrogène, placent notre pays en position de force dans la mise au point et l'utilisation des techniques qui s'y rapportent. De plus, les grandes capacités du Canada et son industrie d'électrolyse de l'eau permettront, en temps et lieu, d'utiliser l'hydrogène d'origine non fossile. Enfin, la maîtrise de l'hydrogène avantagera aussi l'environnement. Ce concours de circonstances donne au Canada un atout unique, à l'aube de l'ère de l'hydrogène.

À long terme, l'électricité et l'hydrogène prévaudront sur le plan énergétique. Il est toutefois plus difficile de prévoir à partir de quelles sources d'énergie ils seront produits. Petit à petit, à mesure que s'épuiseront les sources fossiles et que s'intensifieront les problèmes environnementaux liés à leur usage, on peut s'attendre à ce que les énergies renouvelables prennent l'ascendant. Leur nature et leur proportion varieront d'une région à l'autre. Outre la puissance hydraulique et la fission nucléaire, elles pourraient inclure la fusion contrôlée, l'énergie solaire, la géothermie, les forces marémotrice et éolienne et les sources que nous ne saurions encore imaginer. Les sociétés qui utiliseront l'énergie de ces sources seront profondément modelées par la place prépondérante que prendront l'électricité et l'hydrogène.

Le Canada peut profiter de son rôle prédominant dans la production et l'utilisation de l'hydrogène pour se tailler, dans les technologies connexes, la part du lion. Au départ, il devra s'intéresser aux applications qui présentent un bénéfice immédiat. Le moment venu, il pourra ensuite utiliser les résultats comme tremplin pour s'imposer dans la mise au point de produits comme des véhicules propulsés par de l'hydrogène "propre" (de l'hydrogène très pur), sans oublier des installations de distribution, de stockage et de ravitaillement. Cette étape peut conduire à la création de nouveaux

Les besoins en hydrogène, les sources d'approvisionnement et le recours à des technologies tendent à donner au Canada un avantage concurrentiel marqué, à l'aube de l'ère de l'hydrogène.

Les sociétés s'orienteront vers un avenir modelé en profondeur par l'électricité et l'hydrogène, misant sur les meilleures techniques d'utilisation.

La position remarquable du Canada, dans le domaine de l'hydrogène, pourrait servir de point de départ à la mise au point des meilleures techniques au monde. Celles-ci pourraient renforcer les industries énergétiques existantes et fournir une base à la mise au point de

secteurs de production et de services dont l'exploitation se ferait d'abord au Canada, puis à l'étranger.

Le besoin d'hydrogène pour traiter le brut lourd et le bitume est immédiat; il est probable que les techniques à base d'hydrogène pur seront introduites avant l'an 2000. Leur grande efficacité, leur propreté et leur compatibilité remarquable avec les systèmes électriques en répandront l'usage, de quelques applications importantes à une véritable infrastructure. On commence à peine à utiliser des véhicules propulsés par l'hydrogène : les engins aérospatiaux en donnent la première illustration importante. Les véhicules terrestres devraient faire leur apparition vers la fin du siècle. Une circonstance pourrait accélérer de façon spectaculaire l'introduction de ces technologies : l'intérêt porté aux changements climatiques dus à l'effet de serre et aux autres phénomènes associés à l'oxydation des combustibles carbonés. Le cas échéant, le Canada pourrait profiter d'une telle accélération en conquérant l'hydrogène.

véhicules à l'hydrogène, de même que de produits de consommation nationale et d'exportation.

Le besoin d'hydrogène pour valoriser les sources d'énergie sous-hydrogénées est immédiat; les véhicules à l'hydrogène devraient faire leur apparition avant l'an 2000. "L'effet de serre" pourrait accélérer ce processus de façon spectaculaire.

Ainsi, il pourrait amorcer une évolution industrielle enrichissante et ordonnée, donner un point de convergence à la recherche et au développement, améliorer appréciablement son environnement, créer des emplois et atteindre la croissance et la stabilité économiques, au profit de toutes ses régions. Un pays se voit rarement offrir des perspectives aussi alléchantes.

Cet extraordinaire concours de circonstances donne au Canada une occasion unique de croissance, de stabilité et d'assainissement de l'environnement.

RECOMMANDATIONS

Que le Canada se fixe comme *objectif national d'être le premier à franchir le seuil de l'hydrogène*, notamment à s'accaparer :

1. La production, la purification, le stockage et la distribution de l'hydrogène

Le Canada doit *maîtriser* les technologies qui lui permettront de devenir le producteur d'hydrogène le plus efficace au monde. Le fait de *posséder* ces technologies conduira à des débouchés de production sur les marchés à la fois national et étranger. Les avantages de *mettre au point* et, par conséquent, de *posséder*, plutôt que de seulement *utiliser* ces technologies, forment le point crucial de nos recommandations. La dissociation catalytique du gaz naturel par la vapeur d'eau est actuellement le moyen le moins coûteux de

**L'objectif du Canada :
ÊTRE LE PREMIER À
FRANCHIR LE SEUIL DE
L'HYDROGÈNE.**

Le Canada doit mettre au point et posséder les meilleures technologies pour la production économique d'hydrogène, d'origine fossile ou renouvelable, de même que pour la purification, la distribution et le stockage.

produire de l'hydrogène en quantités industrielles; l'oxydation partielle des combustibles fossiles et l'électrolyse de l'eau sont aussi utilisées. Relever l'efficacité énergétique de la catalyse du gaz naturel, simplifier et améliorer l'oxydation partielle, réduire les coûts en immobilisations de l'électrolyse de l'eau, rendre efficaces la liquéfaction, la distribution et le stockage de l'hydrogène : autant d'exemples des objectifs technologiques qui permettront de maîtriser cette énergie. Enfin, il faudra aussi perfectionner la purification de l'hydrogène d'origine fossile, en particulier s'il doit servir de carburant.

2. L'hydrogénation des sources fossiles lourdes et de la biomasse

Pour que nous atteignions notre objectif, les communautés scientifique et industrielle du Canada doivent s'employer à mettre au point des technologies nouvelles et plus efficaces faisant appel à l'hydrogène pour la production de carburants et de produits chimiques, à partir des ressources fossiles du Canada, abondantes mais sous-hydrogénées. Ces technologies devront d'abord être axées sur des projets utilisant les bruts lourds, le bitume et le charbon canadiens, sans toutefois exclure la biomasse. Ces produits et ces technologies devraient trouver une clientèle mondiale.

Le Canada doit mettre au point et posséder les meilleures technologies afin d'utiliser l'hydrogène pour la production de carburants liquides et d'autres produits chimiques à partir des ressources fossiles et de la biomasse.

3. L'intégration des sources d'énergie

Le traitement à l'hydrogène dérivé du gaz naturel des substances fossiles lourdes et de la biomasse constitue une première étape vers l'intégration générale des multiples sources d'énergie. Les avantages spécifiques de cette intégration sont une meilleure utilisation des ressources, des perspectives favorables à l'environnement, la création d'emplois intéressants, un meilleur rendement, une utilisation accrue des capacités de production, des retombées économiques et une assurance contre les imprévus désagréables. Il faut inciter tous les secteurs de l'énergie à trouver les moyens d'interaction technique et commerciale qui permettront aux Canadiens de profiter au plus tôt d'une telle intégration. Le traitement conjoint de l'huile et du charbon et l'incorporation de l'hydrogène et de l'oxygène électrolytique à l'affinage des huiles lourdes en sont deux autres exemples. On doit rechercher des occasions particulières d'utiliser les possibilités de génération d'électricité du Canada pour la production de combustibles et de produits chimiques. Une usine-pilote d'électrolyse de taille convenable (environ 100 MW) devrait être construite, pour mettre au point des techniques qui diminueront le coût d'électrolyse de l'eau et pour évaluer les liens possibles avec les industries qui utilisent l'hydrogène. On devra rechercher aussi des débouchés à l'étranger de ces technologies et du savoir-faire en conception et en construction.

Le Canada doit se consacrer à mettre au point et à utiliser les meilleures technologies et la meilleure liaison avec l'industrie afin d'intégrer les sources d'énergie, lorsqu'il y a lieu. L'ingénierie et l'industrie de la construction canadiennes pourront, de la sorte, saisir à l'étranger les occasions semblables.

4. L'hydrogène comme carburant

Si l'on veut que l'objectif de développement soit atteint, il faut adopter au pays un programme de mise au point des technologies et des produits qui utilisent l'hydrogène pur. Dans un premier temps, il faudra analyser et chiffrer les avantages comparés de plusieurs produits témoins. Au moins deux véhicules mus par l'hydrogène seront choisis à cette fin : des avions de reconnaissance, des locomotives, des véhicules routiers d'usages spéciaux ou de l'équipement forestier, minier ou de construction. Le choix s'effectuera selon les possibilités d'avancement technique et la valeur marchande et selon les produits mis au point à titre de projet-pilote. Le stockage de l'hydrogène à bord des véhicules sera primordial. Même s'il est trop tôt pour fixer des objectifs particuliers, nous avons retenu, dans notre étude, trois possibilités aux attraits multiples :

- Des locomotives à piles à combustible utilisant l'hydrogène seraient d'excellentes cibles de développement technique, car elles représenteraient un apport à l'industrie ferroviaire du Canada et favoriseraient l'expansion de l'industrie canadienne des piles à combustible, tout en offrant des possibilités de succès commercial sur les marchés canadien et étranger.
- Des véhicules routiers urbains spéciaux, mus par l'hydrogène, pourraient présenter des avantages uniques pour l'environnement et les usagers, poseraient les assises d'une infrastructure de réapprovisionnement et seraient tout indiqués pour percer sur l'immense marché des véhicules routiers.
- La propulsion par l'hydrogène pourrait présenter des avantages opérationnels dans le cas d'avions de reconnaissance attachés à deux bases stratégiques; elle stimulerait l'industrie aérospatiale canadienne et pourrait jouer un rôle important dans la défense et l'affermissement de la souveraineté du Canada.

On ne saurait trop insister sur l'importance de développer des produits alimentés à l'hydrogène, véritable talon d'Achille de la position concurrentielle du Canada.

5. La coordination et les responsabilités

Il faudrait charger une petite agence canadienne de veiller au grain. Sans exécuter les travaux comme tels, elle ferait en sorte que tous les facteurs liés à l'objectif national concourent vers un même but. Elle servirait d'agent mobilisateur des secteurs nationaux du travail, de la technique, de

Le Canada doit mettre au point et posséder les meilleurs technologies, systèmes et produits qui utilisent l'hydrogène "propre" (de l'hydrogène très pur), en particulier des véhicules mus par l'hydrogène. Des avions, des locomotives, de l'équipement de mine et de construction, de même que des véhicules routiers spéciaux semblent offrir des possibilités.

Une agence canadienne est nécessaire pour superviser et pour coordonner le déroulement de la mission; elle doit mobiliser les

l'investissement et de l'entrepreneurship. Le succès dépendra dans une large mesure des capacités, de l'imagination et de la motivation des titulaires des postes clés. L'agence devrait tout de suite retenir les services d'un petit comité composé de membres des milieux scientifiques et industriels, pour entreprendre des évaluations techniques et industrielles afin d'identifier les secteurs les plus prometteurs de la recherche et du développement de produits. Ces études, régulièrement mises à jour, serviraient à cerner les progrès. L'agence travaillerait avec le CRSNG à trouver le moyen d'encourager la recherche sur l'hydrogène dans des universités. Il faudrait lui débloquer des fonds suffisants pour les cinq années de démarrage. Nous estimons que 50 millions de dollars devraient être immédiatement versés à ce titre. Pour mener à bien l'entreprise, qui devrait rapporter des milliards de dollars, il faudrait aussi prévoir des fonds supplémentaires proportionnels aux bénéfices. Les sommes seraient investies sur la foi des retombées prévues. Les investissements dans les appareils et les projets de démonstration devront être élevés et devront se faire en collaboration avec le secteur privé, avec des organismes comme ceux qui s'intéressent à la défense ou aux transports et avec les provinces. L'agence relèvera d'un ministre.

compétences des scientifiques, ingénieurs, hommes d'affaires et entrepreneurs du pays. L'agence devra guider et stimuler, mais non exécuter. Tout en veillant à la qualité et à la bonne marche de l'entreprise, l'agence en référera à un ministre désigné.

LES AVANTAGES

Une telle mission mettra davantage en valeur le caractère distinct du Canada, ce qui consolidera grandement les avantages relatifs du pays sur la scène internationale.

Caractère distinct du Canada.

L'utilisation accrue des produits et de la technologie fondés sur l'hydrogène aura, à plusieurs niveaux, des répercussions favorables sur l'environnement :

Une amélioration marquée de l'environnement dans certains milieux, à l'échelle du pays et dans le monde entier, plus particulièrement sur le plan des pluies acides et de l'effet de serre.

- *Propres à certaines installations* : par exemple, amélioration de la qualité de l'air dans les mines, les entrepôts et les centres sportifs, lorsque seront introduits les véhicules à l'hydrogène.
- *En milieu urbain* : par exemple, réduction du smog et des substances cancérogènes en présence dans l'air, entre autres, à mesure que les véhicules à l'hydrogène feront leur apparition.
- *À l'échelle du continent* : par exemple, diminution des pluies acides à mesure que l'hydrogène sera adopté dans l'industrie des hydrocarbures et dans celle de la métallurgie et que baissera l'utilisation des combustibles fossiles.
- *À l'échelle planétaire* : la combustion réduite des carburants fossiles contribuera à diminuer l'effet de serre.

Le Canada se trouvera en excellente position pour tirer avantage des perspectives économiques nationales et étrangères dans plusieurs domaines. Par exemple :

- Lorsque les surplus de pétrole brut léger disparaîtront, le Canada pourra se servir de ses avantages technologiques pour exploiter de vastes marchés de produits pétroliers dérivés des sables bitumineux et des huiles lourdes.
- Le Canada peut concevoir et construire des installations qui utilisent l'hydrogène tiré du gaz naturel ou de sources renouvelables pour valoriser les sables bitumineux, les huiles lourdes et le charbon. Il pourrait y avoir des possibilités d'ici dix ans.
- D'ici la fin du siècle, le Canada pourrait développer d'importants marchés nationaux et étrangers de produits alimentés en hydrogène propre, en particulier dans le secteur des transports.
- À plus long terme, le Canada pourrait exporter de l'hydrogène, ce qui lui permettrait d'accroître ses ventes d'électricité. Lorsque l'ère de l'hydrogène sera solidement amorcée, le commerce mondial de l'hydrogène pourra sans doute se comparer à celui du gaz naturel liquide aujourd'hui et se rapprochera peut-être des livraisons de pétrole.

Exportation de produits pétroliers réhydrogénés.

Possibilités au pays et à l'étranger de conception et de mise en œuvre de projets.

Les véhicules mus par l'hydrogène et d'autres produits fabriqués au Canada verront s'ouvrir des marchés nationaux et étrangers.

Les exportations à long terme de l'hydrogène seront un débouché important pour la production canadienne d'électricité.

Le Canada se dotera des systèmes nationaux d'approvisionnement en énergie le mettant à l'abri d'imprévus désagréables, qui ne manqueront sûrement pas de se produire. Par exemple :

Le secteur des ressources sera moins facilement atteint par les imprévus désagréables sur le plan économique ou écologique.

- Les technologies de l'hydrogène qui intègrent les sources fossiles et renouvelables pour produire des carburants liquides constitueront, grâce à la flexibilité économique et technique qu'elles entraînent, une garantie contre les perturbations que provoquent l'effondrement ou la fluctuation des prix, les problèmes liés à l'environnement et les aléas de la scène géopolitique.
- Si la combustion des carburants carbonés est à l'origine de l'effet de serre et des changements climatiques désastreux qui l'accompagnent, le Canada, grâce à ses techniques de pointe en hydrogène, pourra aider d'autres pays à résoudre leurs problèmes.

Le Canada aura créé un point de convergence de la recherche et du développement, stimulant par le fait même les centres de recherche universitaires et privés ou publics partout au pays.

Un point national de convergence de la R-D.

Le Canada se sera donné une stratégie qui englobera plus que l'énergie, puisqu'elle fournira une nouvelle base industrielle, dont les objectifs et les avantages profiteront à toutes les régions du pays.

Une stratégie de l'énergie qui aura pour conséquence la collaboration entre les régions et qui profitera à tout le pays.

Puisque les économies basées sur les ressources accusent du retard par rapport aux économies fondées sur la connaissance et la technologie de pointe, le Canada s'assurera une nouvelle prospérité en *maîtrisant les technologies essentielles à un meilleur usage de ces mêmes ressources*. Si l'on commence dès maintenant à mettre sur pied des industries de pointe, il s'ensuivra une transition graduelle qui permettra d'éviter la dépression économique qui accompagne souvent l'érosion d'une structure industrielle. *La formule du succès : canaliser nos énergies dans le développement technologique, plutôt que d'importer des technologies pour exploiter nos ressources.*

D'un paysage de cheminées à un creuset de haute technologie, de l'extraction de matières premières à l'exportation de technologie : le Canada pourrait y parvenir sans les bouleversements que crée l'abandon d'une ressource pour une autre.

L'hydrogène, perspective unique pour le Canada, constituera un apport certain et prometteur : il permettra la création de bons emplois, l'assainissement de l'environnement, la stabilité économique. Par ailleurs, les Canadiens en tireront une assurance nouvelle, issue d'un sentiment d'accomplissement.

Une source d'emplois, de richesse, de lendemains assurés dont pourront tirer fierté tous les Canadiens.

EN PERSPECTIVE...

Nous avons soutenu que le monde, petit à petit, adoptera l'hydrogène. Et si nous nous trompons ? Examinons deux scénarios extrêmes et diamétralement opposés :

Dans un premier scénario, l'ère des combustibles fossiles se prolonge indéfiniment, sans souci de leur épuisement, de l'effet de serre et des autres conséquences environnementales. Nous supposons que, dans un avenir prévisible, le monde utilisera les ressources du charbon, du pétrole et du gaz naturel, sans trop avoir recours aux ressources non fossiles. Une telle vision sous-entend l'utilisation judicieuse des ressources. Il faudrait donc améliorer la technologie afin de produire plus efficacement des combustibles liquides propres à partir des pétroles lourds et, peut-être, du charbon, utilisant pour cela l'hydrogène dérivé du gaz naturel.

Donc, dans un monde à jamais voué aux combustibles fossiles, le Canada tirerait profit d'avoir déjà mis sur pied une mission nationale qui le placerait en tête de la production de combustibles liquides à partir de ses grandes réserves fossiles, l'hydrogène étant le principal facteur d'accroissement de ces ressources. De plus, de nouveaux produits utilisant l'hydrogène feront leur apparition, d'utilisations particulières en aérospatiale à des applications plus grandes, dans le

transport et dans d'autres domaines; l'introduction de ces produits sera due à la demande du marché, puisque l'on exigera des technologies efficaces, propres et sûres. Ces produits permettront au gaz naturel, meilleure source d'hydrogène dérivé de source fossile, de s'imposer sur de nouveaux marchés.

Le second scénario est tout à l'opposé : supposons que la question des changements climatiques catastrophiques causés par les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, conséquence de la combustion des substances fossiles, soit au centre de la géopolitique mondiale. Nous devrions abandonner ces substances au plus tôt et, entre temps, en brûler le moins possible. Simultanément, nous devrions développer des sources d'hydrogène non fossiles et, de façon unique, une gamme de nouveaux produits consommant de l'hydrogène. Encore là, le Canada serait gagnant, tablant sur son énergie électrique non fossile et sur l'hydrogène pour fabriquer les combustibles liquides de transition et pour alimenter les nouveaux produits à l'hydrogène.

En réalité, le Comité consultatif prévoit une évolution moins extrême de la situation énergétique. Toutefois, l'examen de ces scénarios, dont la réalisation est fort peu probable, montre clairement qu'en s'engageant dans cette mission nationale de l'hydrogène, le Canada sera dans une position privilégiée, quoi que lui réserve l'avenir.

TABLE DES MATIÈRES

À propos de mission nationale...		I
Membres du Comité consultatif des perspectives de l'hydrogène		III
Sommaires de la direction		V
Table des matières		XIII
 1 ^{re} partie	 INTRODUCTION	 1
 2 ^e partie	 LES PERSPECTIVES	 6
2.1	L'hydrogène, aujourd'hui	6
2.2	L'hydrogène, à long terme	10
2.3	La transition	16
2.4	La position concurrentielle du Canada	19
 3 ^e partie	 RECOMMANDATIONS	 21
3.1	Avant-propos	21
3.2	Une mission nationale	24
3.3	Le choix du programme	29
3.4	Le meneur de jeu : l'Agence canadienne de l'hydrogène	32
 4 ^e partie	 LES BÉNÉFICES	 34
4.1	Le caractère distinct du Canada	34
4.2	Un environnement propre	35
4.3	Croissance industrielle et création d'emplois	39
4.4	Recherche et développement	42
 5 ^e partie	 DERNIÈRES RÉFLEXIONS	 43
 ANNEXES		
1.	Détails des programmes-types	46
2.	Sécurité de l'emploi de l'hydrogène	61
3.	Le gaz naturel d'origine minérale	62
4.	Les valeurs de l'énergie, vecteurs énergétiques	63
5.	Experts-conseils et personnes-ressources	64

PREMIÈRE PARTIE : INTRODUCTION

Au lendemain de la Deuxième Guerre mondiale, la locomotive Diesel rivalisait avec la locomotive à vapeur en Amérique du Nord; le diesel l'a emporté.

Cette concurrence marquait plus un *tournant technologique* qu'un *choix* entre le charbon et le mazout. Pourtant, la victoire du diesel a décidé du sort du combustible : le mazout a supplanté le charbon. Ce choix a été guidé, non pas par les critères habituels qui régissent la concurrence directe, c'est-à-dire les coûts relatifs ou la disponibilité des combustibles, mais plutôt par des *critères technologiques*, où les combustibles eux-mêmes ont été relégués au second plan.

On pourra juger que voilà une bien singulière entrée en matière pour un rapport qui porte sur l'hydrogène, mais elle jette un éclairage décisif sur le processus d'introduction des combustibles sur le marché. En réalité, les sources d'énergie et les combustibles qui les accompagnent se retrouvent rarement en concurrence directe. Le plus souvent, ils se concurrencent indirectement, étant tributaires de technologies qui s'affrontent. Il ne faudrait pas en conclure que les prix et la disponibilité des différents combustibles n'ont pas d'importance. Néanmoins, s'ils ne diffèrent pas trop, l'enjeu sera déterminé le plus souvent par les technologies, de préférence aux combustibles utilisés.

Ce rapport porte sur l'hydrogène, plus précisément sur les processus techniques et les produits qui dépendent de l'hydrogène. La technologie elle-même influe grandement sur la qualité de la vie; elle est un instrument de politique nationale qui permet de l'améliorer. Ce rapport montre comment les processus et les produits qui dépendent de l'hydrogène sont liés à la création d'emplois et de débouchés à l'exportation, à l'assainissement de l'environnement, à l'ouverture de nouveaux secteurs industriels, à la consolidation des industries existantes et à la sécurité économique nationale. Bref, *ce rapport traite d'un brillant avenir pour le Canada.*

Expliquons maintenant les rapports entre l'hydrogène et l'énergie.

L'hydrogène n'est pas une source d'énergie. Le charbon, le pétrole brut, la puissance hydraulique, l'uranium, le vent et le rayonnement solaire sont des *sources* d'énergie. L'hydrogène n'est pas non plus une *technologie* de l'énergie, comme les locomotives, les avions ou les automobiles. L'hydrogène est une *énergie transformée*, comme l'électricité ou l'essence. Comme l'électricité, on peut le produire à partir d'une source d'énergie. À l'instar de l'essence, on peut le stocker et, donc, l'utiliser comme carburant dans les avions et d'autres véhicules, d'où son intérêt. De plus, grâce à l'hydrogène, de nombreuses sources primaires sont exploitées plus efficacement. Il est en tout *renouvelable* et il est *essentiel* à d'important produits et procédés prometteurs : raffinage des pétroles lourds, transports, communications et industrie chimique.

Ce rapport porte donc moins sur l'énergie que sur les différentes technologies : leur évolution, leur avenir et comment les Canadiens devraient mettre à profit les occasions liées à cette évolution. Les technologies et l'industrie sont sujettes à des cycles, que l'on peut diviser en étapes. Il existe plusieurs façons de classer ces étapes. Nous en avons retenu trois :

- Technologies *embryonnaires* (produits ou procédés). Elles occupent typiquement moins de 0,5 % du marché. Elles requièrent *presque toujours* des apports financiers plus grands que le produit des ventes. Les méthodes habituelles de projection de marché sont, à toutes fins pratiques, inutiles. Souvent l'État y joue un rôle essentiel si la technologie exige une longue maturation et d'importantes immobilisations initiales, comme dans le cas de la mise au point d'avions sophistiqués.
- Technologies *naissantes*. Elles occupent typiquement entre 0,5 % et 2 % du marché. Elles requièrent encore souvent un apport financier plus grand que le volume des ventes, mais la

projection de marché commence à servir à un plan de développement. L'appui de l'État prend souvent la forme d'achats de produits ou de procédés, parfois destinés à des objectifs nationaux, comme la défense.

- Les produits et procédés *établis* ont typiquement franchi le seuil des 2 % du marché. Même si les sociétés particulières peuvent encore réussir ou échouer, selon la qualité de la gestion, la part du marché du *produit de marque* est peu influencée par l'intervention de l'État sauf, peut-être, sur de courtes périodes. Par exemple, des subventions destinées à rescaper une mine de charbon ne sauraient forcer les chemins de fer à retourner aux locomotives à vapeur, en dépit du fait qu'elles peuvent maintenir une mine inexploitée aux dépens d'une autre. La conséquence sera de reporter à plus tard les bouleversements sociaux (au risque parfois d'engendrer une crise plus grave).

Le rôle du gouvernement, souvent essentiel lors des étapes embryonnaires et naissantes, peut être nuisible à l'étape de production. Il n'en demeure pas moins que l'aide de l'État, indispensable au passage des premières étapes, est faible relativement aux contributions que peut apporter l'industrie établie. Ces contributions atteignent habituellement leur sommet lorsque l'industrie amorce ses opérations, car il s'agit souvent d'une période de croissance vigoureuse. Durant la période de point mort ou de régression, les interventions de l'État nécessitent des dizaines ou des centaines de fois plus d'argent qu'au cours des étapes initiales, alors que le rendement est plus faible et peut même être inverse si ces interventions empêchent d'obtenir une position concurrentielle sur le marché.

Le monde s'est déjà engagé dans le processus de transition vers l'hydrogène. Toutefois, les produits et procédés en sont à des étapes très différentes de leur cycle industriel : ces étapes vont de la phase embryonnaire à celle du statut établi. Par exemple, les procédés à l'hydrogène destinés aux engrais et au verre plat sont bien établis. La production d'hydrogène par électrolyse accède à l'étape de naissance. Les cellules à combustible à l'hydrogène sont bien établies en ce qui a trait aux applications spatiales, mais embryonnaires dans le cas des applications terrestres. Les véhicules routiers mus par l'hydrogène existent à l'état embryonnaire, quoique plusieurs des composantes soient plus développées. Cette *disparité des cycles industriels* constitue souvent un obstacle au rapprochement des technologies, à la mise au point, à la vente et à l'utilisation que pourraient en faire les industries.

La reconnaissance de l'étape industrielle est un critère important pour juger du moment où le soutien de l'État sera essentiel, c'est-à-dire quand la mise au point sera bloquée, sans aide, et où l'on peut espérer les retombées maximales. Ce critère est particulièrement utile pour déterminer si une technologie est telle que, sans elle, l'intégration de plusieurs technologies liées à un projet important ne saurait avoir lieu.

Mais, outre l'étape industrielle, il existe un autre critère qui permet de déterminer si l'aide de l'État est appropriée. Il s'agit de savoir si l'initiative profite *directement* à l'investisseur (comme dans le cas d'une usine ou d'un parc d'amusement) ou si elle constitue un encouragement pour la communauté (comme dans le cas des routes ou des relevés géologiques). L'importance d'un produit, *crucial comme source plus générale de stimulation*, peut être complètement négligée s'il est considéré isolément. Le Comité consultatif a longuement étudié cet aspect. Bien sûr, en quelque sorte, toutes les recommandations d'action gouvernementale que l'on trouvera dans ce rapport pourront être considérées comme un apport à la stimulation, ce qui permettra à de nombreux Canadiens de contribuer aux horizons que leur ouvre l'hydrogène et d'en bénéficier.

Voyons comment se présentera la transition vers l'hydrogène.

De nos jours, de grandes quantités d'hydrogène sont utilisées pour fabriquer des produits comme les engrais. L'hydrogène extrait du gaz naturel est utilisé pour fabriquer des produits pétroliers à partir des pétroles lourds et des sables bitumineux. C'est ce que nous appelons l'hydrogène dérivé des substances fossiles (DF)⁺. Cette utilisation de l'hydrogène augmentera, ce qui étendra le marché du gaz naturel et offrira une importante occasion de mettre au point les technologies de production, de distribution et d'usages ultérieurs de l'hydrogène. À plus longue échéance, une deuxième phase de transition fera usage de sources non fossiles renouvelables pour produire l'hydrogène – ce que nous appelons l'hydrogène dérivé de sources renouvelables (DR)⁺. Cette deuxième phase devrait se produire concurremment avec l'introduction de technologies spécialement conçues pour l'hydrogène très pur : nous les appelons "produits consommateurs d'hydrogène"; de ces derniers, les plus importants seront sans doute les véhicules à l'hydrogène.

Nous avons traité brièvement de la transition vers l'hydrogène. La logique de cette transition peut se résumer comme suit :

- D'abord, l'épuisement ou l'inaccessibilité des réserves de qualité supérieure, les répercussions sur l'environnement et l'augmentation des coûts expliquent, en partie, la transition mondiale *de la consommation des énergies non renouvelables* (comme le charbon et le pétrole) *vers les sources renouvelables* (comme la puissance hydraulique et la fission nucléaire). Tour à tour, et selon les circonstances géographiques, le rayonnement solaire, les marées, le vent, la géothermie, voire la fusion nucléaire, viendront s'ajouter aux ressources renouvelables.
- Par ailleurs, *les ressources qui s'épuisent* (le charbon, le pétrole et le gaz naturel) sont, à toutes fins utiles, *les seules sources importantes de combustibles et d'approvisionnements chimiques*, actuellement : nous en tirons des produits comme l'essence, les matières plastiques, le nylon. Donc, si les ressources renouvelables doivent prendre le pas sur les ressources non renouvelables, elles *devront* permettre d'obtenir les mêmes produits. De l'énergie renouvelable, on devra tirer le carburant des voitures et des avions et des substances comme les matières plastiques.
- De plus, *la seule façon* d'obtenir en quantités suffisantes les carburants et les substances chimiques dont a besoin toute la planète sera de fabriquer de *l'hydrogène à partir de l'eau*, soit de décomposer celle-ci en ses constituants, l'oxygène et l'hydrogène.
- Enfin, l'augmentation dans l'atmosphère du taux de gaz carbonique (CO₂), qui résulte de la combustion des ressources fossiles, *aura* pour conséquence des changements climatiques à l'échelle planétaire (l'effet de serre). Ces changements pourraient avoir des effets catastrophiques sur le destin de l'humanité. *La seule façon réaliste de les éviter*, c'est d'utiliser les ressources renouvelables qui produisent l'électricité et l'hydrogène, *car ni l'un ni l'autre ne dégage de CO₂*.

⁺ La catégorie la plus importante de H₂DF est probablement l'hydrogène dérivé de la catalyse du méthane en présence de vapeur (H₂CMV). Dans la documentation sur l'hydrogène, l'expression "dérivé de non-fossiles", ou H₂DNF, sert parfois à désigner ce que nous appelons "dérivé de sources renouvelables" (H₂DR). On peut obtenir de l'hydrogène comme sous-produit d'autres procédés, comme l'électrolyse des chloroalcalins; nous le nommerons H₂DR ou H₂DF, selon le cas.

Deux certitudes, donc, nous portent à conclure que le recours à l'électricité et à l'hydrogène prévaudra à travers le monde entier :

- Le déplacement des sources qui s'épuisent par celles qui se renouvellent ne peut se faire que si l'on accroît l'utilisation de l'hydrogène et ne peut parvenir à bon terme que si l'hydrogène dérivé de sources renouvelables s'impose parmi les combustibles chimiques.
- L'augmentation continue du taux de CO₂ dans l'atmosphère ne peut être réduite que par l'utilisation généralisée de l'hydrogène, et ce problème ne peut être résolu que si l'hydrogène dérivé de sources renouvelables s'impose parmi les carburants chimiques.

La suprématie des sources renouvelables et l'usage généralisé de l'hydrogène et de l'électricité paraissent inévitables. Au cours des quelques décennies à venir, la primauté de l'hydrogène se manifestera surtout dans le traitement de produits pétroliers dérivés des sables bitumineux, des pétroles lourds et du charbon. La majeure partie de cet hydrogène sera fabriqué à partir du gaz naturel par un procédé nommé catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau (CMV)⁺. Plus tard, on utilisera des quantités de plus en plus grandes d'H₂DR, ce qui correspondra à l'introduction des produits consommateurs d'hydrogène, en particulier de véhicules.

Le fait que cette transition comprenne des étapes *progressives* et que chacune d'entre elles comporte une utilisation particulière de l'hydrogène est une circonstance heureuse. En effet, la transition pourra ainsi s'effectuer sans que les infrastructures existantes subissent de trop grands bouleversements.

Le Comité consultatif a tenu compte de tous ces points lorsqu'il a examiné les perspectives qui s'offrent au Canada. Ses membres ont proposé ce qu'ils estiment être une stratégie cohérente et modulée qui pourra être très avantageuse pour le pays; ils y voient *une occasion extraordinaire que devrait saisir le Canada*. L'importance des profits et des avantages, et la concertation et l'ardeur qu'elle suppose, lui vaudraient de figurer au cœur d'une véritable *mission nationale*. Le Comité recommande que le Canada se lance dans une telle entreprise : *qui ne risque rien n'a rien*.

Le Comité consultatif a aussi proposé un calendrier d'action. Si l'entreprise est engagée immédiatement, nous pouvons espérer en bénéficier dans dix ou vingt ans et enregistrer des progrès encourageants d'ici là. La période qui s'étend de 1986 à l'an 2006 pourrait donc servir à mesurer les répercussions et le succès d'une entreprise inaugurée aujourd'hui.

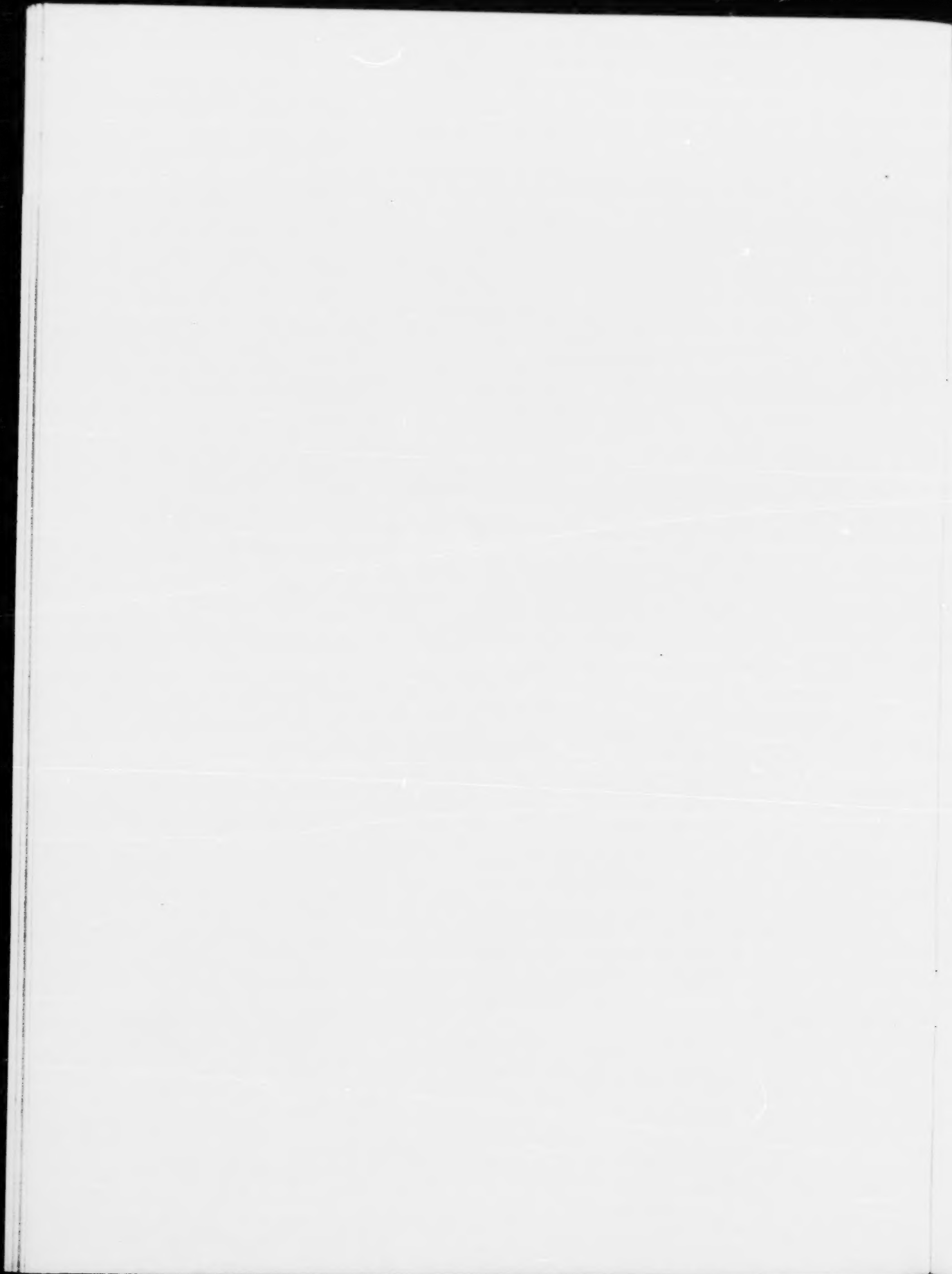
De plus, nous avons tenu compte, dans la formulation des recommandations, de prévisions portant sur le milieu du siècle à venir. Les répercussions d'une mission nationale de l'hydrogène devraient se faire sentir de façon exponentielle au cours de cette période. Mais pour que nous puissions saisir cette occasion, des mesures assurées et sans équivoque devraient être adoptées dès maintenant. Le Canada doit avoir le *courage* de se placer au premier rang, et la volonté *soutenue* d'agir, s'il veut parvenir à la réussite.

+ Notons que, même dans le cas de H₂CMV, la moitié de l'hydrogène produit vient de la vapeur d'eau.

Les recommandations en bref

On peut résumer ainsi les recommandations du Comité :

- Que le Canada se fixe pour objectif d'être le premier à franchir le seuil de l'hydrogène. (cf. section 3.2)
- Que, par étapes et en toute opportunité, le Canada retienne plusieurs projets fondés sur l'hydrogène, sous forme de systèmes intégrés de ressources et de produits consommateurs d'hydrogène. Dans ce domaine, le Canada devrait s'imposer comme meneur mondial avant la fin du siècle. (cf. section 3.3)
- Que soit créée, à partir d'un petit groupe de personnes compétentes et motivées, une agence nationale de l'hydrogène. Cette agence aurait un rôle d'incitateur plutôt que d'exécutant, mais, quoi qu'il en soit, elle devrait être investie du *pouvoir* nécessaire pour diriger les travaux. (cf. section 3.4)



DEUXIÈME PARTIE : LES PERSPECTIVES

2.1 L'HYDROGÈNE, AUJOURD'HUI

Examinons ce que *représente* le téléphone.

Il ne nous viendrait pas à l'idée de juger sa valeur pour notre société uniquement d'après sa consommation d'électricité, pas plus que celle de l'ordinateur, dont la facture d'électricité pèse bien peu, en regard de la richesse qui en découle. De même, l'influence des programmes spatiaux sur l'évolution des sociétés ne saurait se mesurer à la simple quantité d'hydrogène que brûlent les fusées. Il faudrait se rappeler que l'unité énergétique d'hydrogène consommée pour produire du brut synthétique à partir des sables bitumineux libère plus de dix unités énergétiques de produits pétroliers.

L'importance d'une telle unité d'hydrogène est d'habitude beaucoup plus grande que celle d'une unité équivalente de combustible classique. Il est vrai que le Canada consomme de grandes quantités d'hydrogène; mais en se bornant à cette constatation, on risque d'occulter le fait que la valeur d'une énergie n'est pas nécessairement proportionnelle à la quantité consommée.

Cette valeur doit tenir compte de l'importance des produits ou des procédés qui en requièrent l'utilisation.

L'hydrogène au Canada

En 1986, il se consommera environ 186 pétajoules (PJ) d'hydrogène au Canada, soit l'équivalent énergétique de 5 milliards de litres d'essence. Nous pouvons nous faire une idée de ce que vaut cet hydrogène en posant que son coût par unité d'énergie produite est de 6 \$ par gigajoule (\$/GJ), ce qui équivaut à 27 cents par litre d'essence (soit environ 6,36 \$ par million de BTU). Ce coût, modique pour de l'hydrogène sur le marché, est normal pour l'hydrogène recyclé dans les raffineries et, peut-être, obtenu comme sous-produit de procédés industriels. Donc, en posant le coût à 6 \$/GJ (1PJ = 10^6 GJ), un milliard de dollars par année est une évaluation prudente de l'hydrogène consommé au Canada.

On connaît beaucoup d'usages à l'hydrogène, dont l'affinage des sables bitumineux, la fabrication du verre plat et l'hydrogénation des margarines. La production de substances chimiques, comme l'ammoniac, en absorbe le plus, représentant la moitié environ de la consommation annuelle du Canada. Les industries pétrolière et pétrochimique en utilisent plus de 30 %. De ce qui reste, 10 % sont consacrés à la production de brut synthétique à partir des sables bitumineux d'Athabasca, et les derniers 10 % servent à divers usages, comme l'hydrogénation des margarines.

Au Canada et ailleurs, on s'attend à ce que l'accroissement de l'utilisation de l'hydrogène au cours des prochaines décennies s'explique, pour la plus grande part, par la fabrication de produits pétroliers à partir des ressources fossiles lourdes, processus que l'on peut qualifier de "conservation du carbone".

Le Canada possède quelques-uns des plus vastes dépôts de sables bitumineux. Ces gîtes seraient irrécupérables sans l'addition d'hydrogène. Aujourd'hui, la production de chaque baril de brut synthétique requiert environ 0,30 GJ d'hydrogène. Chaque année, l'hydrogène dont on se sert pour traiter les sables bitumineux recèle une énergie équivalente à celle de 500 millions de litres d'essence. Afin d'améliorer le rendement et de minimiser les répercussions environnementales des produits dérivés des sables bitumineux, il est prévu que la quantité d'hydrogène utilisée pour traiter chaque baril passera à environ 0,5 ou 0,7 GJ d'ici à vingt ans. Comme on prévoit que la production de brut atteindra un million de barils par jour au cours de la même période, la demande

en hydrogène pour le traitement des sables bitumineux devrait augmenter de six à dix fois avant l'an 2006.

La plus grande partie de l'hydrogène actuellement fabriqué au Canada résulte de la catalyse du gaz naturel en présence de vapeur d'eau (H_2 CMV). Par conséquent, la demande à la hausse d'hydrogène devrait accroître de façon importante le marché du gaz naturel. À long terme, le Canada a la possibilité de produire l'hydrogène à partir de sources d'énergie renouvelables, comme la puissance hydraulique et nucléaire, aujourd'hui confinées à la production d'électricité : elles sont, si l'on peut s'exprimer ainsi, condamnées au "ghetto de l'électricité". Ces excellentes capacités, fort différentes, représentent une base solide à partir de laquelle le Canada pourra s'affirmer comme grand maître de la production de H_2 DR.

Le Canada peut s'estimer heureux que ces deux sources d'hydrogènes, du fait de leurs capacités respectives de production fort différentes, ne puissent s'entraver l'une l'autre. La croissance que connaîtront les deux modes de production sera forcément avantageuse, puisque le marché se trouvera partagé en différents secteurs d'utilisation, qui pourront d'ailleurs s'approvisionner entre eux, particulièrement si les initiatives entreprises à l'échelle du pays viennent stimuler cette croissance.

Depuis un certain temps déjà, le Québec est conscient des possibilités qu'offre l'hydrogène comme débouché pour ses immenses réserves hydrauliques, à preuve l'usine d'électrolyse de 7 MW construite à Bécancour et le chapitre entier que consacre le premier ministre, M. Robert Bourassa, à cette question dans son livre, intitulé *L'énergie du nord; la force du Québec*. D'autres provinces pourraient aussi mettre en valeur leurs énergies hydraulique et nucléaire, mais il semble que le Québec les ait gagnées de vitesse.

En ce qui a trait aux technologies, la plupart des sociétés pétrolières font de la R-D en purification et en traitement de l'hydrogène. Le consortium Hydro-Québec, Electrolyser Inc. et Noranda est à perfectionner de l'équipement électrolytique de pointe, un apport indispensable à l'engagement du Canada dans les technologies de H_2 DR.

Pourtant la R-D canadienne sur l'hydrogène a connu des contretemps. Le budget fédéral de novembre 1984 a pratiquement annulé le programme géré par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC). De façon semblable, le gouvernement de l'Ontario a mis fin à l'appui qu'il offrait à l'Institut des systèmes à hydrogène, moins de deux ans après la fondation de cet établissement. Il semble que l'Ontario ait perçu l'hydrogène dans le cadre limité d'un combustible de remplacement, sans en voir la portée sur le plan du développement technique. Au CNRC, l'hydrogène ne constituait qu'un élément d'un vaste programme d'énergies de remplacement et il n'était donc pas étudié du point de vue du raffinage ou de la production de brut synthétique. Il est remarquable que, contrairement aux autres, le Québec ait maintenu sa volonté de mettre au point les technologies de l'hydrogène, en partie par la fondation, conjointement avec le gouvernement fédéral, d'un centre de technologie électrochimique à Shawinigan. De son côté, le gouvernement fédéral, ayant pris conscience des extraordinaires caractéristiques de l'hydrogène qui le situent dans une classe à part parmi les "énergies nouvelles", a fondé le Comité consultatif des perspectives de l'hydrogène.

Deux organismes tiennent une place importante dans le domaine des activités canadiennes liées à l'hydrogène. Le premier, le Bureau de recherche de technologies des sables bitumineux de l'Alberta (BRTSBA), s'intéresse à l'affinage des sables bitumineux par l'hydrogène. Le second, le Conseil de l'industrie de l'hydrogène (CIH), est un regroupement d'industries canadiennes qui s'intéressent à l'hydrogène. Ce regroupement pourrait jouer un rôle capital dans la mission que nous recommandons, du fait surtout que ses membres sont déjà représentatifs du secteur privé, des sociétés d'État, des universités et du gouvernement.

L'hydrogène à l'étranger

Aux États-Unis, l'hydrogène présente ceci de remarquable qu'il sert communément de carburant pour les véhicules spatiaux. Même si cette utilisation absorbe moins de 1 % de la production américaine, elle n'en représente pas moins une étape importante dans l'histoire, parce que les véhicules de l'espace constituent le premier secteur des transports où domine l'hydrogène⁺. Le programme spatial est également le centre d'activités liées à la mise au point des technologies à l'hydrogène pur, y compris la liquéfaction, le stockage, la manutention, les mesures de sécurité, les piles à combustible et le matériel compatible. Des sociétés aéronautiques ont entrepris des études de faisabilité d'avions commerciaux propulsés par l'hydrogène liquide (H_2L). Un projet récent propose la mise au point d'un véhicule transatmosphérique qui pourrait voler de Washington à Tokyo en deux heures. Même si les quantités d'hydrogène en jeu ne sont pas énormes, il n'en demeure pas moins que la base technologique s'en trouve élargie, ce qui aura un effet certain sur l'introduction d'autres applications de l'hydrogène.

En Allemagne, la mise au point des technologies de l'hydrogène suit une voie différente. En tant que partenaire du programme spatial européen, l'agence aérospatiale DFVLR est à mettre au point le nouveau moteur HM-60 à l'hydrogène pour la fusée Ariane, dans ses installations de Stuttgart. DFVLR ne se borne pas au programme spatial. Il est à mettre au point un générateur de vapeur à l'oxygène-hydrogène capable de produire 40 MW. Il mène des projets de voiture, conjointement avec Daimler-Benz et BMW. Il met au point de petites pompes à H_2L . Il collabore avec les États-Unis à l'étude de la réfrigération par effet magnétocalorique. On y fait aussi de la recherche sur le stockage de H_2L à bord de véhicules terrestres et sur leur ravitaillement. Enfin, avec l'Arabie Saoudite, DFVLR compte mettre au point des techniques de production d'hydrogène par énergie solaire.

Pour donner une idée de ce que seront les infrastructures de l'hydrogène, mentionnons la firme allemande Hüls, qui obtient de grandes quantités d'hydrogène comme sous-produit de quatre procédés, y compris de la production d'acétylène à partir du gaz naturel et de la fabrication de chlore et d'hydroxyde de sodium par électrolyse de solutions salines. Pour distribuer cet hydrogène, la firme Hüls a inauguré, en 1938, la construction d'un gazoduc qui s'étend aujourd'hui sur 210 kilomètres et qui alimente en hydrogène dix-sept établissements industriels de la Ruhr.

L'établissement nucléaire allemand Kernforschungsanlage (KFA), à Jülich, se propose principalement de mettre au point des réacteurs à haute température refroidis par gaz, qui visent les marchés de l'énergie à la fois chimique et électrique. Les travaux comprennent les cycles thermo-chimiques pour la production de H_2DR et le fractionnement (et la recombinaison) à haute température du méthane, technique où l'hydrogène joue un rôle essentiel. Ailleurs en Allemagne, des sociétés mettent au point et lancent sur le marché des cellules d'électrolyse à haute pression ou à haute température.

L'Allemagne, en raison de ses activités diversifiées, possède probablement le programme d'hydrogène le mieux *équilibré*. Presque toute la recherche industrielle y est subventionnée par le ministère fédéral de la Recherche et de la Technologie.

Plusieurs autres pays, notamment la France et le Japon, ont mis sur pied d'importants programmes d'hydrogène. Par exemple, la société Air Liquide exploite, en France, un gazoduc à hydrogène qui est à la fois plus étendu et plus fortement pressurisé que celui de Hüls, en Allemagne.

Ces exemples américains et allemands visent plus à donner une idée générale de ce qui se passe outre-frontières qu'à faire un bilan mondial.

+ L'hydrogène domine, mais il ne détient pas le monopole. Par exemple, on se souviendra que c'est la défaillance d'une fusée à combustible solide qui a causé la perte de la navette Challenger. En plus de son utilisation comme propergol, l'hydrogène sert, lors des vols habités, dans des piles à combustible où, combiné à l'oxygène, il produit de l'électricité et, comme sous-produit, de l'eau potable.

De retour au Canada

Le tour d'horizon que nous venons de faire pourrait aussi montrer que le pays qui se voit offrir les plus belles possibilités, sans doute le Canada, n'est pas nécessairement celui qui met le plus d'efforts.

Un exemple d'occasion que pourrait rater le Canada est le cas de l'électrolyse chloro-alkaline de la firme Hüls. Ce procédé exige comme matière première du sel (NaCl), de l'eau et de l'électricité. Or, la centrale nucléaire Bruce de l'Ontario est particulièrement choyée en électricité bon marché, en dépôts souterrains de sel et en eau douce. De la même façon, en Allemagne, le chlore produit sert, entre autres usages, à la fabrication de PCV et à la chloration des hydrocarbures. Tournons-nous maintenant vers l'Alberta. Là, parce qu'il n'existe pas de gazoduc à cette fin, une étude récente du CIH a montré qu'environ 600 tonnes d'hydrogène, sous-produit de différentes industries, sont chaque jour déchargées dans l'atmosphère. À raison de 6 \$/GJ, voilà presque un demi-million de dollars chaque jour dispersé aux quatre vents.

On peut résumer ainsi la situation de l'hydrogène au Canada :

- L'hydrogène utilisé au Canada vaut plus d'un milliard de dollars par année.
- Son effet multiplicateur comme créateur de richesses est plus important que celui des combustibles liquides et solides et il se rapproche sans doute de celui de l'électricité. Donc, les répercussions économiques des procédés et des produits de l'hydrogène valent beaucoup plus qu'un milliard de dollars par année.
- La plus grande partie de l'hydrogène canadien est utilisée comme réactif pour la production de substances chimiques et de produits pétroliers.
- L'usage de l'hydrogène se répandra avec l'introduction de nouvelles technologies.
- Aujourd'hui, l'hydrogène provient surtout du gaz naturel. La croissance de la demande d'hydrogène stimulera le marché du gaz naturel.
- Au Canada, l'élaboration de la technologie de l'hydrogène se fonde sur les produits et les procédés pétrochimiques et sur l'électrolyse de l'eau.
- Il n'existe pas d'activités notables au Canada visant à mettre au point des produits consommateurs d'hydrogène, ni pour les transports ni pour les applications fixes.
- Il n'existe pas d'activités notables au Canada visant à mettre au point des technologies de distribution, de stockage et de ravitaillement.
- Les capacités de génération d'électricité placent le Canada en bonne position pour devenir un producteur important de H₂DR à partir de l'eau.

2.2 L'HYDROGÈNE À LONG TERME

Les ordinateurs et les réseaux téléphoniques fonctionnent à l'électricité, qu'elle provienne de sources d'énergie nucléaire, hydraulique ou thermique. Un long-courrier qui vole vers l'Europe consomme du mazout; il est sans intérêt de savoir si ce carburant provient de brut ordinaire ou de sables bitumineux. Ce sont les formes de l'énergie, et non ses sources, qui conditionnent les produits et procédés.

À long terme, le commerce de l'énergie sera dominé par l'électricité et l'hydrogène. Mais il est plus difficile de préciser de quelles sources ils proviendront. Qu'à cela ne tienne, l'avenir appartient à l'électricité et à l'hydrogène.

Sources du phénomène

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, voici les principales raisons qui motivent le passage à l'ère de l'hydrogène :

- Les réserves mondiales de combustibles fossiles de haute qualité sont en voie d'épuisement. Ce n'est pas que nous allons manquer de pétrole, de charbon ou de sables bitumineux, mais plutôt que les réserves restantes seront de qualité inférieure et plus difficiles à extraire, donc plus coûteuses et plus dommageables pour l'environnement. Les problèmes inhérents aux combustibles fossiles devraient nous inciter à nous tourner vers des sources renouvelables.
- Nos préoccupations concernant l'environnement nous incitent également à nous intéresser aux sources renouvelables. La combustion des substances fossiles est bien documentée comme source de pluies acides et de pollutions atmosphériques. Le monde est dorénavant confronté à un problème environnemental sans précédent : la possibilité de changements climatiques planétaires, que l'on nomme souvent effet de serre, causés par une augmentation des concentrations de gaz carbonique dans l'atmosphère. Les combustibles fossiles sont sans doute les premiers responsables, bien que le problème soit aggravé par d'autres émissions industrielles et par un déboisement généralisé. Un réchauffement global de 2 °C vers le milieu du XXI^e siècle est presque inévitable. Il provoquera d'importants changements climatiques régionaux, la mise en péril de certains cycles de production alimentaire et des sécheresses localisées. À long terme, les régions côtières, où se trouvent la plupart des grandes villes du monde, seront immergées, suite à la montée du niveau des mers. Même si nous prenions des mesures draconiennes pour réduire les émissions de CO₂ dès la fin du siècle, leur concentration dans l'atmosphère aura déjà, aux environs de l'an 2050, doublé par rapport au taux de l'époque pré-industrielle. Ainsi, bien avant de manquer de combustibles fossiles, nous devons nous tourner vers des sources renouvelables qui ne produisent pas de gaz carbonique.
- Les énergies fossiles actuelles (solides, liquides ou gazeuses) sont les seules sources importantes de combustibles chimiques. Par ailleurs, elles sont à l'origine de nombreux produits chimiques. Il importe donc que les sources renouvelables servent à la fabrication d'une énergie qui puisse se substituer à l'essence, au mazout et aux autres combustibles servant aux transports. L'hydrogène est la seule qui réponde à ces exigences.
- N'importe quelle source d'énergie renouvelable peut servir à produire soit de l'électricité soit de l'hydrogène. Les deux sont renouvelables dans la pleine acception de ce terme. En effet, dès qu'on utilise l'électricité, que l'on peut considérer comme un flux de charges élémentaires

libres, la matière redevient neutre. De la même façon, l'hydrogène se retransforme en eau, dont il est un élément constituant. Cette qualité essentielle élimine toute dégradation de l'environnement, puisque la matière d'origine demeure intacte, ce qui d'ailleurs résout la question d'épuisement des ressources : on ne peut pas plus manquer d'hydrogène que d'électricité.

- L'hydrogène est la *seule* énergie chimique qui puisse être produite en quantité suffisante par toutes les sources renouvelables, partout sur terre. La question a souvent été posée : "Y a-t-il une autre possibilité ?" Aucune ne s'est imposée. Il est remarquable qu'une option, pourtant unique, recèle tant d'avantages.
- Aujourd'hui, la puissance hydraulique est la source renouvelable privilégiée au Canada, quoique le nucléaire jouisse d'une situation semblable en Ontario. Contrairement au Canada, la plupart des pays développés préfèrent la puissance nucléaire. Si la croissance de la fission nucléaire est ralentie (suite en partie à l'accident de Tchernobyl), il se peut que la transition vers les sources renouvelables accuse quelque retard, en attendant la mise au point de la fission améliorée et d'autres techniques d'utilisation des énergies renouvelables. Peu importe de savoir quelle source dominera. L'essentiel à retenir, c'est que l'avenir appartient aux sources renouvelables.
- Une question demeure. Si nous admettons qu'il faudra délaisser les sources fossiles en faveur des sources renouvelables et que celles-ci conviennent à la production d'électricité, *pourquoi ne pas tout miser sur l'électricité ?* On peut répondre, bien sûr, que l'électricité, sans substance, ne peut se stocker : impossible de faire voler un avion à l'électricité. Mais la considération essentielle est sans doute celle-ci : pourquoi mettre la seule électricité à notre service, quand nous avons l'hydrogène et que les deux font si bon ménage ?

Caractéristiques de l'ère de l'hydrogène

Pour comprendre comment l'électricité⁺ et l'hydrogène se partageront la tâche, voyons comment ils se complètent l'un l'autre :

- On peut stocker beaucoup d'hydrogène, contrairement à l'électricité.
- L'électricité peut transporter de l'énergie sans mouvement matériel; l'hydrogène ne peut le faire.
- L'hydrogène peut servir de produit chimique ou de matière première; il n'en va pas de même pour l'électricité.
- Avec de l'électricité, on peut emmagasiner et traiter de l'information; l'hydrogène ne peut servir à ces usages.
- À l'instar du gaz naturel, l'hydrogène peut être acheminé à l'échelle des continents, voire, comme le pétrole, à l'échelle du monde; le transport de l'électricité se fait sur des distances plus courtes.

⁺ Quand nous parlons d'électricité, nous incluons ses manifestations sur tout le spectre du rayonnement électromagnétique.

De toute évidence, les deux formes d'énergie se complètent et elles peuvent satisfaire aux exigences futures de la consommation et de l'industrie. L'électricité sera utilisée comme elle l'est aujourd'hui : pour l'éclairage, le traitement de l'information, les systèmes de transport sur réseau fixe de haut achalandage, comme les métros, aussi pour les grandes lignes ferroviaires et, peut-être, à long terme, pour des véhicules rapides qui fileront dans les tunnels où l'on aura fait le vide. L'hydrogène sera le carburant de choix pour la plupart des applications qui requièrent des carburants liquides. Les avions brûleront de l'hydrogène, les véhicules autonomes comme les voitures et les motoneiges feront le plein d'hydrogène, tout comme les trains (à l'exception, peut-être, des lignes à très haute densité, comme les métros). L'hydrogène servira aussi à la fabrication de produits synthétiques, comme les engrais et les matières plastiques.

Comme nous nous servons depuis près d'un siècle de l'électricité, qui a profondément modelé notre façon de vivre, nous en connaissons bien les technologies. Même si les ordinateurs, les postes de télévision et les magnétoscopes seront sans doute améliorés et que de nombreux appareils électriques feront leur apparition, on peut se représenter dans ses grandes lignes l'évolution dans ce domaine.

Par contre, les technologies et les produits qui utilisent l'hydrogène, pour faire voler les avions ou rouler les voitures, seront *foncièrement* différents des produits actuellement utilisés à ces fins. Tout comme le moteur électrique qui a remplacé le cheval pour tirer les voitures, il faut s'attendre à ce que le moteur à hydrogène soit très différent du moteur à combustion interne. Même les moteurs thermiques à hydrogène ressembleront très peu aux modèles actuels. Ainsi, les réacteurs des avions commerciaux hypersoniques à l'hydrogène n'auront rien des propulseurs contemporains.

Certaines tâches pourront être assurées *indifféremment par l'hydrogène ou par l'électricité*. Le chauffage domiciliaire en est un bon exemple. On pourra se servir soit d'électricité ou d'hydrogène. L'hydrogène pourra être brûlé, par exemple, dans des plinthes catalytiques : une partie de l'eau produite servira à rectifier l'hygrométrie, alors que le reste sera condensé. Puisqu'on n'aura pas besoin de cheminée pour évacuer les produits de combustion, toute l'énergie que fournira l'hydrogène servira au chauffage, plutôt que de se perdre, en partie, dans les cheminées, comme c'est le cas avec les chaudières au mazout ou au gaz. De plus, contrairement à l'électricité, l'hydrogène s'ajuste facilement à la variation de la demande de charges. D'autre part, les pompes à chaleur électriques produisent un chauffage ou une climatisation très efficace, technologie qui continue de faire des progrès constants. Il est donc très difficile de prévoir laquelle de ces technologies assurera notre chauffage. Sans doute les deux auront leur place, sans compter que l'on saura toujours goûter une soirée au coin du feu.

Cette étude des sources d'énergie s'applique aux services contemporains. Bien que l'on entende souvent dire que la nécessité est mère de l'invention, il arrive encore plus souvent que ce soit l'invention qui crée le besoin. L'histoire montre bien que l'introduction d'une nouvelle forme d'énergie est habituellement suivie de nombreuses technologies nouvelles qui s'imposent petit à petit et qui, d'utiles qu'elles étaient, deviennent indispensables. Il y a cent ans, le téléphone était loin d'être essentiel, même si le maire visionnaire d'une ville américaine se plaisait à dire qu'il entrevoyait le jour où chaque ville posséderait un appareil. L'indispensable technologie du téléphone, telle que nous la connaissons, était tout à fait inconcevable jusqu'à ce que les savants s'intéressent à l'électricité.

Dans le même ordre d'idées, il est difficile pour nous, en 1986, de supputer les merveilles technologiques auxquelles donnera naissance l'hydrogène lorsqu'il sera devenu un produit de consommation courante. Par contre, nous pouvons compter qu'il aura son cortège de produits parce que ses propriétés sont presque aussi exceptionnelles que celles de l'électricité et que le génie de l'homme ne pourra résister à la tentation de les exploiter.

L'ère de l'hydrogène et de l'électricité se caractérisera encore de cinq autres façons.

- D'abord, l'environnement sera plus propre. Les villes, en particulier, seront plus agréables à habiter. Les brouillards pollués, la plupart des émissions cancérogènes et plusieurs autres polluants associés aux grandes villes pourront être, en grande partie, éliminés.
- Deuxièmement, en comparaison des technologies contemporaines axées sur le pétrole, celles de l'hydrogène seront, en général : 1) plus efficaces, 2) plus durables et exigeant moins d'entretien et 3) plus chères à l'achat, mais moins coûteuses à exploiter. Ces caractéristiques correspondront à l'abandon de la société du gaspillage, mouvement déjà amorcé d'ailleurs. En effet, nous assistons au mouvement pendulaire : de la société de conservation de l'ère pré-industrielle (causée par la pauvreté), le monde s'est tourné vers la société du gaspillage (dans la première ivresse de l'abondance) pour en revenir à la société de conservation (fondée cette fois sur des produits durables, de grande qualité et très efficaces).
- Troisièmement, la conversion électrochimique de l'énergie prendra plus d'importance, peut-être jusqu'à reléguer au passé les omniprésents moteurs thermiques d'aujourd'hui. Tous les organismes vivants transforment, par électrochimie, leur combustible (leur nourriture) en travail pour croître, courir, nager ou voler. Ce processus n'a pas été repris par les ingénieurs qui, il y a deux siècles environ, ont inventé des machines pour transformer le combustible en travail. Ils ont plutôt conçu des machines thermiques, dont la machine à vapeur reste la première illustration. N'empêche que la conversion électrochimique de l'énergie est par nature plus efficace, même si elle est handicapée par une plus petite puissance spécifique. L'hydrogène se prête particulièrement bien à ce type d'application, et sa grande conductibilité aboutira sans doute au développement de technologies qui relèveront cette puissance spécifique⁺.
- Quatrièmement, plus qu'un substitut des combustibles fossiles actuels, l'hydrogène sera vraiment le pendant de l'électricité. On peut facilement obtenir de l'hydrogène à partir de l'électricité, et l'hydrogène peut aisément être transformé en électricité. Les deux sont parfaitement interchangeables, ce qui est loin d'être le cas des autres formes d'énergie. Si les combustibles fossiles sont sources d'électricité, l'inverse n'est pas toujours possible : on ne peut pas extraire de l'essence de l'électricité.
- Cinquièmement, certains prédisent que, dans un avenir lointain, la plus grande partie de l'énergie proviendra d'un petit nombre d'immenses centrales, peut-être d'exploitations solaires dans le Sahara, de plate-formes océaniques mouillant dans le Pacifique Sud, ou encore d'usines de fusion thermonucléaire implantées dans des régions éloignées. On peut obtenir de l'hydrogène de ces sources, sans passer par l'électricité. Il lui sera donc préféré pour de telles utilisations, puisque sa facilité de distribution et de stockage lui permettront de devenir l'objet d'un commerce mondial. Normalement, l'électricité sera fabriquée sur place, peut-être sur demande, à partir de piles à combustible utilisant de l'hydrogène. Il est donc juste de qualifier ces horizons lointains d'*ère de l'hydrogène*.

+ Les technologies contemporaines de conversion électrochimique de l'énergie comprennent les accumulateurs, les piles à combustible et les électrolyseurs. On peut dire que tout ce qui transforme du carburant en électricité ou en travail est un moteur thermique, y compris les moteurs d'autos et d'avions, et même les centrales nucléaires. L'utilisation de la puissance éolienne ou hydraulique ne transforme pas un carburant mais plutôt de l'énergie cinétique ou potentielle en travail ou en électricité et n'entre donc pas, comme tel, dans la catégorie des appareils électrochimiques ou des moteurs thermiques. Nous utilisons ici le terme "électrochimie" dans son sens le plus large, de façon à y inclure et les échanges d'ions et la filtration sur membrane.

Le plus important peut-être reste à dire. Il est rassurant de savoir que nous approchons de l'ère de l'hydrogène. Si l'humanité parvient à éviter la guerre nucléaire, l'hydrogène et l'électricité sont les promesses d'un brillant XXI^e siècle, d'une réconciliation de l'Homme avec la nature, un gage de meilleure qualité de vie, de meilleures conditions de travail.

Fixer l'avènement de l'ère de l'hydrogène

Il y avait plusieurs façons d'aborder cette question.

Nous avons d'abord examiné l'évolution de la part relative que prend chaque source dans la demande globale pour tenter d'évaluer le moment où les sources renouvelables produiront plus d'énergie que n'en peut absorber le marché de l'électricité. On peut en conclure que la production de H₂DR atteindra des quantités appréciables vers la fin du siècle. Nous avons ensuite étudié l'évolution du rapport hydrogène-carbone (H/C) des formes d'énergie utilisées depuis 150 ans. Cette étude révèle une progression constante des rapports H/C et montre, elle aussi, que la consommation d'hydrogène pur fera un bond aux environs de l'an 2000-2006 et affichera ensuite une croissance uniforme. Enfin, nous avons fait un relevé de l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère. Même si cette méthode se prêtait moins à l'analyse rigoureuse, elle permet de penser que des interventions politiques globales seront prises, aux environs de l'an 2000, pour réduire les émissions de CO₂.

Le Comité consultatif, compte tenu de ce calendrier des événements et d'autres considérations, conclut ainsi :

Vers le milieu du siècle prochain, il y a d'excellentes raisons de croire que presque la moitié de l'énergie primaire proviendra de sources renouvelables et le reste, de sources fossiles. On s'attend à ce que la source fossile principale soit le gaz naturel. Le pétrole et le charbon seront probablement recherchés surtout pour leur teneur en carbone et, grâce à l'addition généralisée d'hydrogène, ils dégageront peu de CO₂ lorsqu'ils serviront à la production de ce que l'on nomme actuellement les "produits pétroliers". En conséquence de ces prévisions, on peut raisonnablement avancer que, vers le milieu du siècle prochain, le marché énergétique sera, en gros, divisé en trois parts : un tiers à l'électricité, un autre tiers aux hydrocarbures liquides et le dernier tiers à l'hydrogène. Environ les deux tiers de cet hydrogène seront sans doute dérivés du gaz naturel et le reste, des sources renouvelables.

Passé le milieu du XXI^e siècle, des sources d'énergie que nous n'avons pas encore imaginées se manifesteront peut-être. (Il suffit de penser que les physiciens qui se consacrent aux constituants ultimes de la matière imagineront tôt ou tard des moyens de maîtriser ces réactions fondamentales libérant beaucoup d'énergie). Au moins une de ces sources pourrait, en son temps, supplanter celles que nous utilisons ou sommes à mettre au point. L'incertitude des sources à long terme n'influe pas, cependant, sur les formes d'énergie. Aucun scénario ne peut logiquement en imposer de nouvelles, une fois que l'électricité et l'hydrogène auront été pleinement adoptés.

Quoi qu'il en soit, dans l'optique du présent rapport, les conclusions les plus importantes qui ressortent de ces considérations sur l'avenir sont les suivantes : il y a lieu de croire que le H₂DR commencera à s'imposer vers la fin du présent siècle, pour connaître par la suite une croissance rapide. À peu près à la même époque, il est permis de croire que l'utilisation de produits consommateurs d'hydrogène prendra son essor.

Le présent siècle s'achève dans treize ans. Si l'on se reporte dans le temps, il y a treize ans, nous étions en 1974. Cela semble-t-il loin ?

Pourquoi avoir considéré l'avenir à long terme

S'ils veulent planifier les initiatives, les Canadiens doivent avoir une idée de ce qui les attend à long terme : un avenir dont ils ne peuvent tout savoir mais dont ils peuvent dégager des certitudes. Pour ce qui est de l'avenir énergétique, il est heureux que nous en sachions plus sur les énergies que sur les sources. La plupart des pays misent sur plusieurs sources. Les Canadiens seraient avisés de parier sur les formes parce que, quelle que soit la nouvelle source qui l'emportera, nous savons qu'elle servira à produire de l'hydrogène et de l'électricité.

Lorsqu'il s'agit de planifier des initiatives sur une ou deux décennies, il est peu réaliste de vouloir tout connaître dans le détail, et selon une chronologie précise.

Malgré tout, certains se demanderont peut-être pourquoi le Canada devrait prendre les devants. Ils pourraient redouter une action trop précipitée ou trop lente. Le Canada a souvent accusé du retard dans les technologies de la fin du XX^e siècle et il a accompli bien peu de cette façon. Peut-être le moment est-il venu d'oser se faire remarquer ?

2.3 LA TRANSITION

Si nous considérons l'ère de l'hydrogène, il semble que les circonstances se soient combinées pour faciliter la transition, qui apparaîtra comme l'évolution normale du monde tel que nous le connaissons.

Cette évolution se fera sur deux fronts à la fois.

D'une part, elle s'appuiera sur le rôle fondamental que joue l'hydrogène lorsqu'au moins deux sources d'énergie sont intégrées pour la production plus efficace de plusieurs formes d'énergie. Nommons ce volet *l'intégration des ressources*. L'intégration du gaz naturel et du pétrole lourd en vue de la production de produits pétroliers en est un exemple courant. Les puissances hydraulique et nucléaire pourront être intégrées au gaz naturel, au pétrole lourd et au charbon pour produire, entre autres, de l'électricité, de l'hydrogène et des produits pétroliers.

D'autre part, elle intensifiera le recours à l'hydrogène pur dans les technologies *spécialement* conçues pour *mettre à profit* les propriétés de l'hydrogène. Ce sont les technologies des *produits consommateurs d'hydrogène*. Le meilleur exemple que l'on connaisse est le véhicule spatial, auquel s'ajouteront des trains, des avions et d'autres produits.

L'intégration des ressources

Afin de bien faire comprendre de quoi il s'agit, divisons les sources actuelles d'énergie en deux catégories : 1) les ressources fossiles solides, liquides et gazeuses qui nous restent et 2) les sources renouvelables non fossiles qui commencent à se manifester.

À mesure que les dépôts de ressources fossiles liquides et solides de haute teneur sont exploités, on assiste à une *diminution* des rapports hydrogène-carbone (H/C). En même temps, la demande mondiale de carburants liquides au rapport H/C élevé *augmente*, avec pour conséquence un appauvrissement des sources liquides et solides en hydrogène. D'autre part, la ressource fossile gazeuse qu'est le gaz naturel présente un rapport H/C de quatre, de sorte qu'elle est trop pauvre en carbone pour servir directement à la fabrication de carburants liquides. Donc, chacune de ces sources, si elle sert uniquement à la production de combustible liquide, a un rapport H/C déficient.

De ces deux lacunes (le manque de carbone du gaz naturel et le manque d'hydrogène des sources solides et liquides), la plus grave est de loin le *manque essentiel d'hydrogène* des sources fossiles liquides et solides. Le tableau suivant illustre la situation :

Substance	Rapport atomique H/C
Gaz naturel	4
Combustibles liquides (carburants d'autos et d'avions)	2,1 - 2,3
Pétrole brut classique	1,8 - 1,9
Sables bitumineux d'Athabasca	1,4 - 1,6
Charbon typiques	0,7 - 0,9

On peut grandement réduire les inconvénients liés au déséquilibre H/C en utilisant de systèmes de production qui intègrent plusieurs sources d'énergie. Le gaz naturel et le bitume offrent l'exemple

type d'un système intégré de première génération, aujourd'hui courant. Le pivot de cette intégration est l'hydrogène.

Mais l'intégration des ressources limitées de pétrole lourd et de gaz naturel n'est que la pointe de l'iceberg. Les sources renouvelables affichent, *elles aussi*, des déséquilibres. Là aussi, l'intégration des sources fossiles et renouvelables peut beaucoup aider à surmonter les déficiences d'une source renouvelable unique.

L'obstacle *commun* à toutes les sources d'énergie renouvelables est le *déséquilibre quotidien ou saisonnier* de l'offre et de la demande. Par exemple, les réacteurs nucléaires sont plus rentables lorsqu'ils fonctionnent en production continue, de préférence à pleine charge. D'autres sources renouvelables, comme les marées, le vent et le rayonnement solaire, sont grevées de déséquilibres plus importants encore de l'offre et de la demande. Le soleil ne brille pas nécessairement au moment où la demande d'électricité est la plus grande, par exemple en décembre, à 18 h. À mesure que les sources renouvelables fourniront une plus grande part de notre énergie, ce déséquilibre essentiel s'aggravera. (Par exemple, lorsqu'un réacteur CANDU fournit plus que sa charge nominale, les contraintes de production continue ont de plus en plus de répercussions sur son exploitation.) Ce n'est pas un défaut inhérent aux sources qui cause ce déséquilibre, mais plutôt un défaut de l'exploitation qui dédie ces sources à la seule production d'électricité.

De nos jours, l'hydrogène sert à intégrer le gaz naturel et le bitume pour la production de bruts synthétiques. À l'avenir, il permettra aussi l'intégration des sources renouvelables et non renouvelables. Les sources renouvelables peuvent servir à fabriquer de l'hydrogène pendant que la demande d'électricité est faible, et cet hydrogène peut à son tour servir à combler le manque des sources fossiles lourdes. L'hydrogène devient donc un instrument d'intégration qui contribue à dégager de leurs limites à la fois les sources fossiles lourdes et les sources renouvelables. L'hydrogène va s'imposer comme "énergie universelle".

L'intégration des sources d'énergie comporte en principe trois grands avantages :

- D'abord, elle mène à un meilleur environnement, puisque moins de CO₂ est rejeté.
- Ensuite, elle offre un filet de sécurité. Par exemple, si de nouvelles capacités de production d'électricité surpassent la demande, les surplus peuvent être dirigés vers la fabrication de combustibles liquides et de substances chimiques. Or, en admettant que d'hypothétiques embargos sur le pétrole étranglent les approvisionnements, l'énergie des sources renouvelables pourrait contribuer à la production de produits pétroliers. (Ce sont des problèmes différents, mais ils admettent une solution semblable.)
- Enfin, la production intégrée exige habituellement moins de matières premières et moins d'énergie pour un même rendement.

Produits consommateurs d'hydrogène

La seconde phase de transition vers l'ère de l'hydrogène, représentée par les produits consommateurs d'hydrogène, a été inaugurée, de façon évidente, par la conquête de l'espace. Une navette spatiale ou un module d'exploration lunaire ne pourrait utiliser du carburant de turbo-réacteur, qui l'alourdirait trop. Pour la même raison, les véhicules transatmosphériques projetés, moitié avion, moitié fusée, devront *forcément* utiliser de l'hydrogène. Les contraintes techniques interdisent le recours à tout autre carburant.

Plus tard, les produits consommateurs d'hydrogène pénétreront les marchés où l'on pourrait utiliser d'autres carburants, parce qu'ils seront nettement moins chers, plus efficaces ou moins polluants. Songeons entre autres à l'équipement minier : les gaz d'échappement des moteurs diesel

que doivent actuellement respirer les mineurs et le coût consécutif de la ventilation pourraient faire pencher la balance du côté de l'hydrogène. Les piles à combustible permettront une plus grande efficacité qui, à elle seule, suffira parfois à leur donner un avantage décisif.

Les locomotives pourraient, elles aussi, bénéficier des piles à combustible. Dans un avenir plus lointain, des automobiles à l'hydrogène, comportant à la fois des accumulateurs et des piles à combustible, rouleront sur nos routes sans dégager de gaz toxique.

Comment ces deux phases convergent

Ces deux volets de l'ère de l'hydrogène ont actuellement peu de points en commun. À mesure que ces deux secteurs utiliseront plus d'hydrogène, toutefois, les bienfaits de la coopération mutuelle se feront sentir. Par exemple, les réseaux de distribution de l'hydrogène, comme les gazoducs et les réservoirs de stockage, serviront à la fois à alimenter les usines à production intégrée et les marchés de produits consommateurs d'hydrogène. Mais bien avant que les infrastructures de distribution et de livraison unissent les deux secteurs, il y aura de nombreux avantages à la coopération. Donnons comme exemple, parmi d'autres, le développement d'une technologie des matériaux compatibles avec l'hydrogène, de codes industriels et des techniques de production et de purification de l'hydrogène. Cette coopération pourrait aussi conduire rapidement à la création de consortiums créateurs de grands débouchés commerciaux.

2.4 LA POSITION CONCURRENTIELLE DU CANADA

La transition vers l'hydrogène aura sur les peuples et les modes de vie des répercussions comparables à celles qu'engendra le remplacement de l'huile de baleine par les combustibles fossibles, ou encore le remplacement des lampes à l'huile et des bougies par les lampes électriques. Les pays et les industries qui se trouvent parmi les initiateurs de ce type de transition en récolteront des avantages pendant de nombreuses générations. L'idée de se trouver au premier rang est cruciale. Le Comité consultatif a défini un ensemble de critères qui permettent d'évaluer la position concurrentielle qu'occupe le Canada.

Critères fondamentaux d'évaluation

- Un pays qui détient d'importantes réserves d'hydrocarbures sous-hydrogénés se trouve en bonne position pour amorcer la transition vers l'hydrogène. Bien que le charbon et les pétroles lourds satisfont à ce critère, il est plus facile de fabriquer des combustibles liquides à partir du pétrole qu'à partir du charbon; donc, les pétroles lourds et les sables bitumineux sont plus avantageux.
- Le **Canada** possède certaines des plus grandes réserves de sables bitumineux du monde, en plus d'importantes réserves de charbon et de pétroles lourds.
- Dans les quelques prochaines décennies, le reformage du gaz naturel en présence de vapeur d'eau demeurera souvent la méthode la plus économique pour fabriquer de l'hydrogène. Les pays qui auront des réserves abondantes et accessibles de gaz naturel et les infrastructures connexes seront privilégiés.

Le **Canada** dispose d'abondantes réserves de gaz naturel et d'une bonne infrastructure.

- Les pays ayant les moyens de produire, à partir de sources non fossiles (en pratique, les puissances hydraulique et nucléaire), une électricité bon marché peuvent utiliser ces capacités pour s'assurer la main haute sur la production de H_2 DR.

Le **Canada** est un des principaux producteurs d'hydroélectricité, et il dispose en plus d'une excellente technologie nucléaire. Les projets hydrauliques du nord du Québec, du Labrador et de la Colombie-Britannique, comme les projets nucléaires de l'Ontario, pourraient tous être mis à contribution. L'électricité ainsi produite coûte à peu près la moitié de ce qu'elle coûte ailleurs dans le monde.

- Un pays qui dispose de telles capacités aurait intérêt à se doter d'une industrie nationale d'électrolyse.

Le **Canada** possède une des plus anciennes industries de fabrication électrolytique au monde.

- Un pays qui a déjà une raison de fabriquer des produits spéciaux consommateurs d'hydrogène aura nettement avantage à en élargir la gamme.

Les États-Unis et la Communauté européenne, à cause des nombreuses applications qu'ils ont développées en aérospatiale, disposent d'un tel avantage concurrentiel. L'Allemagne s'est donné un vaste programme de développement de produits alimentés en hydrogène. *Le Canada n'a pas pris position.*

Le contexte canadien

Le Canada pourrait partir de son *besoin* d'hydrogène en intégration des ressources pour s'établir comme leader mondial des technologies. Mais pour mettre à profit ces circonstances, il doit s'orienter vers le développement de ses *propres* technologies d'intégration des ressources et doit aussi mettre au point des produits consommateurs d'hydrogène.

S'il agit rapidement, s'engage à fond et travaille d'arrache-pied, le Canada pourrait rattraper les pays qui mettent présentement au point des produits alimentés en hydrogène; malgré l'avance prise par certains, la situation n'est pas irrémédiable, car les technologies en sont encore à l'étape embryonnaire ou naissante. D'autre part, ces pays n'auront jamais autant de ressources naturelles. Avec résolution et acharnement, nous pouvons regagner le temps perdu. En revanche, un pays ne saurait créer de rien le pétrole et le gaz qui lui manquent, ni faire naître, sur des fleuves absents, un pouvoir hydraulique, peu importe sa détermination et son zèle.

Peu de pays ont cette combinaison unique de circonstances historiques, géographiques et culturelles qui favorisent autant le développement de l'hydrogène. Du fait de sa grande étendue (deuxième au monde) et de sa très faible densité de population, le transport et les communications sont pour le Canada d'importance vitale. Les véhicules propulsés par l'hydrogène et les postes de communication alimentés par des piles à combustible répondent à ces besoins stratégiques, tout en offrant une cible idéale pour s'imposer. L'histoire du Canada propose de nombreux exemples de grandes réalisations dans les domaines des ressources et des transports. On peut citer le chemin de fer transcontinental, la Voie maritime du Saint-Laurent, les motoneiges, le développement des sables bitumineux, la capacité hydraulique et la mise au point du réacteur CANDU.

Ces éléments culturels et géographiques propres au Canada peuvent contribuer à la bonne marche d'une entreprise nationale de l'hydrogène. On sait que le Canada tire la plupart de ses richesses de ses ressources naturelles. Il est donc logique qu'il fonde ses espoirs sur leur intégration et leur exploitation, développant et intensifiant, par le fait même, son caractère distinct. Il pourra alors exporter ses produits et son savoir-faire partout dans le monde.

Dès lors, il est facile de dégager l'intérêt d'une telle mission pour le Canada:

Le Canada aura rarement pareille occasion de prendre les rênes d'une évolution technologique dont l'avènement et la rentabilité sont si évidents, en particulier lorsqu'une renaissance technologique est aussi impérieuse. C'est dans cet esprit que le Comité consultatif présente ses recommandations.

TROISIÈME PARTIE : RECOMMANDATIONS

3.1 AVANT-PROPOS

Le calendrier

Ce rapport, ses recommandations et l'évaluation des bénéfices se fondent sur un calendrier de 10 à 20 ans, qui s'explique comme suit :

- D'ici 10 à 20 ans, tous les pays industrialisés devraient prendre conscience de l'évolution mondiale vers l'hydrogène. Si le Canada s'engage maintenant dans une entreprise nationale, il aura eu le temps de prendre pied comme chef de file à la fois dans la conscience nationale et dans l'infrastructure industrielle. Si le Canada ne réussit pas à prendre une avance commerciale pendant cette période, il aura tant à faire pour se rattraper que la mission sera impossible.
- Il n'est pas dans les mœurs de l'industrie canadienne de planifier sur dix à vingt ans. Sa période de récupération de l'investissement dépasse rarement les dix ans. Alors qu'une période plus longue, par exemple de 50 ans, est hors de la portée des décisions politiques, une stratégie pour une ou deux décennies est en plein du domaine des gouvernements. Le choix d'un tel intervalle s'appuie sur le nombreux précédents : du développement industriel japonais CAO/FAO⁺, en passant par le développement aux États-Unis des grands avions, jusqu'à la construction d'un chemin de fer, au Canada, pour unifier le pays.
- Enfin, pour que l'entreprise de l'hydrogène réussisse, il est essentiel de l'assortir d'échéances convenables qui permettent de fixer des objectifs ambitieux mais réalisables donnant une idée des progrès accomplis. Elles sont aussi essentielles pour assurer une continuité à la R-D et à la planification à long terme. (La réussite appartient à ceux qui savent voir loin, qui sont capables de résister aux engouements de situations passagères.)

Les recommandations couvrent la période qui s'étend du présent jusqu'au début du siècle prochain. Si elles sont adoptées, elles auraient probablement comme conséquence immédiate de raviver l'esprit de la nation. À plus long terme, elles devraient aboutir à des réalisations concrètes (dès 1991) et à une amélioration sensible du bien-être du pays (de 1996 à 2006). L'application de ces recommandations conduira le Canada au seuil de l'ère de l'hydrogène, rapidement mais rationnellement. Ces recommandations visent à donner l'impulsion initiale, non à planifier la maturité du Canada en pleine ère de l'hydrogène. Notre pays alors saura bien voir à ses intérêts, parti d'un si bon pas, tant il est vrai que "l'enfant préfigure l'homme, tout comme l'aurore annonce le jour"[†].

Le coût de l'hydrogène

Le Comité consultatif tient pour acquis que, pendant les vingt prochaines années, le coût de l'énergie produite à l'hydrogène, par exemple en dollars par gigajoule (\$/GJ), sera plus élevé que celui des combustibles classiques. Puisque, au cours de cette période, la plus grande proportion de l'hydrogène proviendra du gaz naturel, c'est le H₂CMV qui servira de prix de référence[‡].

Le coût de l'hydrogène par unité d'énergie, si on le fabrique en grandes quantités, ne devait pas dépasser le double de celui du gaz naturel. En fait, il semble qu'un coût de 1,6 fois plus élevé soit, pour l'hydrogène gazeux, tout à fait raisonnable. Le coût de la liquéfaction peut augmenter cette

⁺ Conception assistée par ordinateur, et fabrication assistée par ordinateur.

[†] John Milton, *Paradise Regained* (traduction libre).

[‡] Le procédé d'extraction de l'hydrogène à partir du gaz naturel se nomme "catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau"; d'où la désignation H₂CMV. (cf. note p. 3)

proportion de 30 à 50 % pour l'hydrogène liquide. Le rapport du coût de l'hydrogène pourrait diminuer par rapport à celui du gaz naturel, si l'on introduit des techniques améliorées de catalyse du méthane et si des facteurs géographiques favorisent l'hydrogène obtenu de sources renouvelables (H_2DR).

Il importe, en affaires, de pouvoir prévoir et limiter le coût de cette nouvelle richesse énergétique par rapport à une autre, bien connue. Les investisseurs qui projettent de développer de nouveaux produits alimentés en hydrogène auront ainsi une certaine marge de sécurité, parce que le carburant auquel ils s'intéressent jouera d'une stabilité de prix associée au principal facteur, le gaz naturel; il n'en serait pas ainsi si la production de l'hydrogène dépendait de nouvelles technologies non encore maîtrisées. En d'autres termes, les investisseurs seront plus enclins à se lancer dans des produits alimentés en hydrogène s'ils connaissent le coût de ce nouveau carburant (H_2) par rapport à celui d'un carburant classique d'usage commun.

La capacité du H_2DR de desservir le marché dépendra d'à quel point on réussira à en abaisser le coût de façon à le rendre égal ou inférieur à celui de l'hydrogène extrait de substances fossiles (H_2DF), ce qui signifie en pratique qu'il devra pouvoir se comparer au prix de référence H_2CMV . L' H_2 dérivé des sources renouvelables pourra, dans des conditions géographiques particulières, s'avérer économique. Ces circonstances pourront même être rehaussées si les mesures appropriées sont prises pour écouler des sous-produits comme l'oxygène et, peut-être, l'eau lourde. Le H_2DR accapatera une part croissante du marché de l'hydrogène, à mesure que s'élargira l'écart du coût entre les combustibles classiques et l'électricité, au profit de celle-ci, en particulier de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables. On peut s'attendre, probablement après l'an 2000, à ce que le coût de l'énergie de sources renouvelables tombe, de façon notable, en deçà du coût des combustibles liquides classiques. Le prix de référence de l'hydrogène deviendra alors le prix du H_2DR , et l'hydrogène coûtera moins que les combustibles classiques.

On peut aussi comparer le coût prévu de l'hydrogène avec celui des combustibles liquides.

On peut raisonnablement s'attendre à ce que le coût du gaz naturel ne dépasse pas 75 % environ de celui du pétrole brut. Comme nous avons prédit plus tôt que l'hydrogène ne coûtera probablement pas plus du double du gaz naturel, nous pouvons affirmer que le coût de l'hydrogène n'excédera pas 1,5 fois le prix du pétrole brut ($2 \times 0,75 = 1,5$). En fait, et particulièrement si l'on met au point de meilleures techniques de production de H_2CMV , le coût de l' H_2 gazeux ne saurait dépasser 1,6 fois celui du gaz naturel, ce qui équivaut, pour l'hydrogène, à un coût de 1,2 fois celui du pétrole brut ($1,6 \times 0,75 = 1,2$). Puisque le coût des combustibles liquides est nécessairement plus élevé que celui du pétrole brut dont on les extrait, le coût de l'hydrogène devrait être moins de 1,2 fois le coût des combustibles liquides, compte tenu de la valeur énergétique.

En somme, pour ceux que ces paragraphes auraient laissés perplexes, si l'hydrogène était produit en grandes quantités, au moyen des meilleures technologies, il ne coûterait pas plus que l'essence ou les autres dérivés du pétrole. Donc, en supposant au départ qu'il coûtera plus que les combustibles classiques au cours des vingt prochaines années, nous faisons preuve de la plus grande prudence.

Légiférer à bon escient

Le prix d'un carburant peut avoir une tout autre évolution que son coût. La question des prix relève de la législation et de la politique d'État, et de la stratégie des entreprises. Lorsque le H_2CMV sera vendu en grandes quantités, par exemple pour l'approvisionnement des locomotives ou pour satisfaire à un réseau de distribution par gazoduc, son coût pourrait bien tomber en deçà des prix marchands actuels de l'hydrogène. Toutefois, lorsque de telles quantités commencent à influencer sur la vie économique d'un pays, la tentation est forte de fixer les prix et de percevoir des taxes. Les lois adoptées dans ce domaine devront chercher à encourager l'essor de l'hydrogène. Les différents ordres de gouvernement devraient user de leur pouvoir législatif pour stimuler, non pour entraver les progrès de l'hydrogène.

Répercussions sur les produits consommateurs d'hydrogène

C'est le coût de l'hydrogène, en comparaison du coût des combustibles liquides classiques, qui déterminera les objectifs de rendement que les technologies de l'hydrogène doivent atteindre si l'on veut qu'elles aboutissent au succès commercial. Conformément à la conclusion précédente qui veut que le coût de l'hydrogène soit environ 1,2 fois celui des combustibles classiques (au début, peut-être beaucoup plus), les produits alimentés en hydrogène doivent donner un bien meilleur rendement que les produits alimentés en combustibles fossiles qu'ils ambitionnent de remplacer. Un rendement d'au moins 50 % supérieur serait raisonnable, puisque le coût d'investissement des produits alimentés en hydrogène sera sans doute plus élevé, sans compter que les coûts sur la durée de vie utile devront être inférieurs.

Les technologies mises au point *spécialement* pour tirer profit des propriétés exceptionnelles de l'hydrogène (par exemple, sa légèreté, ses avantages pour l'environnement et sa compatibilité particulière avec les systèmes de transformation électrochimique de l'énergie) affichent généralement un rendement supérieur.

Par exemple, les véhicules de l'espace fonctionnent tellement mieux à l'hydrogène qu'aux combustibles classiques qu'en l'absence d'hydrogène, l'atterrissage sur la lune aurait été retardé⁺ de vingt ans et aurait coûté beaucoup plus cher. Les projets d'avions propulsés par l'hydrogène promettent des rendements de 2 à 3 fois plus grands que ce que peuvent réaliser les avions alimentés en combustible classique, et les avions transatmosphériques seraient inconcevables sans hydrogène. Les piles à combustible à l'hydrogène fonctionnent avec une efficacité de 2 à 3 fois plus grande que celles de la plupart des moteurs à combustion interne des véhicules de transport actuels. Donc, la technologie des piles à combustible, lorsqu'elle aura été convenablement adaptée à la propulsion des véhicules terrestres, pourra être la clé qui généralisera l'usage de l'hydrogène.

Ces niveaux de rendement indiquent que des perspectives nombreuses vont s'ouvrir aux technologies développées *pour exploiter* les avantages de l'hydrogène, plutôt que pour en *surmonter* les contraintes. On pourrait être tenté d'adapter les technologies existantes à l'hydrogène. Parce que ces technologies fonctionnent rarement aussi bien qu'avec les carburants pour lesquels elles ont été conçues, ces modifications ont peu de chances d'être couronnées de succès commercial.

Ainsi, l'automobile modifiée pourra certainement rouler à l'hydrogène – faire le tour du pâté de maisons, sous les feux des caméras. Mais sans doute le moteur modifié sera-t-il moins efficace. Le réservoir occupera tout le coffre arrière, les conduites seront engorgées d'hydrures métalliques. Le véhicule coûtera plus cher, tout comme le carburant. Certes, le véhicule est possible. Toutefois, plutôt que de *tirer avantage* de l'hydrogène, il n'en aura que *surmonté* des difficultés d'utilisation.

Nous devons nous consacrer aux technologies conçues expressément pour *mettre à profit* les propriétés de l'hydrogène pur, seules promesses d'avenir.

⁺ Pendant la mise au point de matériaux d'avant-garde qui pourraient "compenser" le poids beaucoup plus élevé des carburants classiques.

3.2 UNE MISSION NATIONALE

Ses grandes lignes

Un dessein commun peut parfois animer un peuple. L'histoire en donne de nombreux exemple : la conquête de l'espace, la lutte contre la sous-alimentation et l'analphabétisme, la victoire sur un ennemi, l'endiguement de la mer, la construction d'un chemin de fer pour donner naissance à un pays. Ce sont là des missions nationales, de grands desseins pilotés avec lucidité et détermination et recevant habituellement la faveur populaire. Qui plus est, de telles entreprises marquent l'âme d'un peuple et modèlent son destin.

Heureusement, le Canada n'est pas en guerre, il a déjà son chemin de fer et, contrairement aux Pays-Bas, il n'a pas à lutter contre la mer. Il est libre de se donner une mission axée sur le développement économique, la qualité de la vie et de l'environnement, la création d'emplois et la R-D, tout en s'assurant la première place dans certaines technologies. Par une telle mission, il peut se donner une fierté et une confiance nationales.

Le Comité consultatif est d'avis que, compte tenu du stade de développement actuel du Canada, peu de projets pourraient peser plus dans son avenir qu'une entreprise qui lui procurerait ces avantages. Pour réussir, la mission devra réunir la plupart des conditions que voici :

- Un leadership politique de l'État fédéral;
- Un large appui des provinces, de l'industrie, des syndicats de travailleurs, des groupes écologistes, des universités et du milieu des affaires;
- Une constance de l'appui politique, pour au moins deux décennies;
- La concordance avec les caractéristiques canadiennes sur le plan de l'industrie, de la géographie, des ressources, de l'histoire, des compétences techniques et des capacités de recherche et avec l'idée qu'a le peuple de lui-même;
- La compatibilité avec l'image qu'ont les autres pays du Canada, afin de favoriser la création de marchés d'exportation;
- Un point de convergence pour de multiples activités pluridisciplinaires en R-D;
- Un but qui parvienne à mobiliser les compétences et l'enthousiasme des Canadiens.

La mission de l'hydrogène regroupe déjà certaines de ces conditions (comme la compatibilité avec les structures industrielles, géographiques et historiques). D'autres conditions, comme le leadership politique, ne dépendent que des représentants élus. (Il n'est pas indispensable que tous les critères se trouvent réunis : par exemple, la perception qu'avaient les autres pays du Japon, il y a trente ans, ne l'a pas empêché de s'imposer comme producteur de biens de grande qualité.)

Pour ce qui est du leadership, les représentants élus du Canada sont en bonne position pour aisément s'acquiescer l'appui du public. Dans les quelques cas où des membres du Comité consultatif ont exposé, à titre personnel, le concept d'une mission nationale de l'hydrogène à de plus vastes publics canadiens, les réactions étaient du genre : "c'est en plein ce qu'il nous faut".

Hydrogène : la raison d'être d'une mission nationale

En plus de nous demander si l'hydrogène peut satisfaire aux critères d'une mission nationale, nous avons cherché à savoir si, en l'absence d'une telle mission, il y avait moyen de réaliser toutes les possibilités que fait miroiter l'hydrogène. La réponse est négative.

Il est essentiel que soit créé un groupement national pour fournir un point de ralliement à l'industrie, aux groupes de recherche et aux investisseurs, pour encadrer la mise au point des produits et les sociétés en coparticipation, de sorte à pouvoir tirer parti des débouchés canadiens et étrangers. En voici les raisons :

- En l'absence d'une telle mission, les milieux universitaires du Canada ne verront pas l'importance d'orienter la R-D de façon à réaliser les objectifs canadiens dans le domaine de l'hydrogène. Par exemple, avant la fondation du BRTSBA, qui se consacre au traitement des sables bitumineux, peu d'universitaires albertains se livraient à ce genre de recherches. La création du BRTSBA a nettement intensifié les travaux de recherche dans les établissements supérieurs de l'Alberta et du Canada. Si l'on fait porter l'intérêt sur l'hydrogène, les universités, prenant acte de ce fait, devraient à la longue offrir des cours qui prépareront les étudiants à de futures carrières dans ce domaine. Prenons l'exemple particulier de l'électrochimie. De nombreuses études⁺ ont souligné l'importance croissante de ces technologies pour des applications comme le traitement anti-corrosion, le traitement chimique et la conversion des énergies. Pourtant, les efforts en électrochimie du Canada affichent un recul constant depuis 1945, créant ainsi un vide inquiétant dans un domaine technologique crucial. Une mission de l'hydrogène serait un point de convergence vers un effort encore plus vaste de développement de l'électrochimie.
- De nos jours, la plupart des exploitants de ressources maximisent les bénéfices de leurs actionnaires en achetant des technologies de l'étranger, plutôt qu'en en développant. Les contraintes de coûts et de temps justifient ces achats. De plus, les sociétés manufacturières qui fournissent ces technologies ont leurs sièges sociaux à l'étranger. Le Canada possède les industries de base mais peu d'industries produisant les technologies de pointe dont il se sert.
- La plupart des pays industrialisés avec lesquels le Canada est en concurrence ont mis au point des moyens de concertation des efforts des investisseurs, du gouvernement, de l'industrie, du milieu de travail et du monde universitaire afin de réaliser des objectifs à long terme. L'Allemagne et le Japon sont passés maîtres de cette coordination, planifiée sur plusieurs années et axée sur la croissance. Si le Canada veut être concurrentiel à l'échelle mondiale, il doit faire preuve de plus d'efficacité dans l'intégration de ces secteurs. Il évitera ainsi les doublages, encouragera la collaboration, regroupera les ressources économiques, formera des corps de métier spécialisés, stimulera la coentreprise et minimisera les risques courus par chaque groupe. Mais cette convergence de moyens ne peut être atteinte sans une forme de regroupement, concrétisé par une mission nationale.
- Sans un regroupement national pour inciter à l'action concertée et pour stimuler et garantir la continuité, l'ensemble des petites entreprises, qui devrait être l'un des principaux intervenants et bénéficiaires des possibilités de l'hydrogène, se verrait privé d'une structure qui puisse lui inspirer confiance en vue d'investissements à long terme. L'apport de la petite entreprise est essentiel : celle-ci a toujours été efficace lorsqu'il s'est agi de stimuler l'innovation et de permettre aux talents créateurs de s'exprimer.
- Une mission nationale permettra le développement de technologies qui pourront ouvrir des débouchés mondiaux aux produits et au savoir-faire canadiens : conception et réalisation de projets reliés aux hydrocarbures lourds qui intègrent gaz naturel ou sources de traitement d'énergie renouvelables, construction à l'étranger d'une usine de sables bitumineux ou de charbon utilisant les procédés canadiens d'affinage à base d'hydrogène et d'oxygène en

+ Cf. Whitehead, J. R. et Lapp, P. H., *Study on the Establishment of an Electrochemical Technology Centre*, février 1981.

provenance d'usines électrolytiques de conception canadienne et alimentées en électricité dérivée des technologies canadiennes (hydraulique ou nucléaire).

En résumé, si nous voulons en réaliser toutes les promesses, il est essentiel de faire de l'hydrogène une mission nationale. Un dessein commun doit unir tous les secteurs, faute de quoi le Canada, sur le plan de la concurrence, peut se retrouver Gros-Jean comme devant. Le Canada doit saisir l'occasion avant que ne le fassent d'autres pays, moins avantagés mais plus déterminés et prévoyants.

Ce que devrait procurer la mission

Le gouvernement du Canada devrait prendre des mesures et des engagements :

- Qui assurent un leadership avisé et efficace reflétant l'importance de la transition vers l'ère de l'hydrogène.
- Qui inspirent confiance au milieu des affaires, afin qu'il songe à investir dans le domaine de l'hydrogène.
- Qui orientent et fassent converger les travaux des universités et des centres de recherche.
- Qui assurent l'information du public et la diffusion des connaissances.

Ce que devrait accomplir la mission

1. Production, purification, distribution et stockage de l'hydrogène

Le Canada devrait mettre au point et posséder les meilleures technologies afin de s'assurer une production économique de l'hydrogène (dérivé de sources fossiles ou de sources renouvelables) et sa purification, sa distribution et son stockage.

Le Canada devrait posséder ses propres technologies, ce qui lui permettrait d'être le producteur d'hydrogène le plus efficace du monde. La *propriété* des technologies mène à des *débouchés* à la fois nationaux et mondiaux. Toutes nos recommandations gravitent autour des avantages, pour le Canada, de développer les technologies et, par conséquent d'en être le *propriétaire*, plutôt que de simplement les *utiliser*. De nos jours, la catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau est ordinairement le procédé le moins cher de fabrication d'hydrogène à l'échelle industrielle. L'oxydation partielle des combustibles fossiles et l'électrolyse de l'eau en sont d'autres. L'amélioration du rendement de la catalyse, un procédé plus simple et plus fiable d'oxydation partielle, la diminution des coûts d'amortissement, l'élargissement de la gamme des eaux convenant à l'électrolyse et le perfectionnement des procédés, la réalisation de liquéfaction, de distribution et de stockage sont autant d'exemples des objectifs technologiques que devrait viser la mission. Les technologies de purification de l'hydrogène dérivé de substances fossiles doivent être améliorées, particulièrement si cet hydrogène doit servir dans des produits consommateurs d'hydrogène comme les véhicules.

2. *Hydrogénation de la biomasse et des sources fossiles lourdes*

Le Canada devrait développer et *posséder* les meilleures technologies d'*utilisation* de l'hydrogène pour la production de combustibles liquides et d'autres produits chimiques à partir des sources fossiles et de la biomasse.

La réussite exige une collaboration dynamique des secteurs scientifique et industriel du Canada, qui pourront ainsi perfectionner les technologies de l'hydrogène servant à la production de combustibles classiques et de substances chimiques dérivés des ressources fossiles canadiennes, abondantes mais sous-hydrogénées. Ces technologies devraient d'abord être mises au point pour le traitement des bruts lourds, du bitume et du charbon canadiens, sans négliger cependant les possibilités qu'offre la biomasse, notamment le bois et la tourbe. Ces produits et technologies devraient trouver des débouchés un peu partout au monde.

3. *Intégration des sources d'énergie*

Le Canada devrait mettre au point et utiliser les meilleures technologies et les meilleurs moyens de concertation industrielle afin d'intégrer les sources d'énergie partout où cela est possible. Cette expérience nationale permettra aux industriels et aux groupes de génie de trouver des débouchés.

L'addition aux sources fossiles lourdes et à la biomasse d'hydrogène dérivé du gaz naturel constitue une première étape vers l'intégration généralisée de plusieurs sources d'énergie. L'avantage inhérent à l'intégration peut aboutir à une meilleure utilisation des ressources, à un assainissement de l'environnement, à des rendements accrus, à une utilisation plus rationnelle des capacités et à une garantie contre les caprices du marché international. On doit encourager tous les secteurs de l'énergie à établir les données d'une concertation des techniciens et du monde des affaires qui permettra aux Canadiens de profiter au plus tôt de l'intégration des sources. Le traitement simultané du charbon et du pétrole et l'adjonction d'hydrogène et d'oxygène de provenance électrolytique à l'affinage des pétroles lourds sont deux autres exemples d'intégration. On devrait chercher à multiplier les occasions de mobiliser les capacités de production d'électricité du Canada pour la production de combustibles et de substances chimiques. Une usine-pilote de taille convenable (peut-être de 100 MW) devrait être construite, afin de mettre au point des techniques qui réduisent le coût de l'électrolyse de l'eau et d'évaluer les possibilités de concertation technologique avec les industries consommatrices d'hydrogène. On devrait envisager les possibilités d'exporter ces technologies et ces compétences en conception et en construction.

4. *Produits consommateurs d'hydrogène*

Le Canada devrait mettre au point et *posséder* les meilleures technologies, systèmes et produits qui utilisent l'hydrogène "propre" (l'hydrogène très pur), particulièrement pour les véhicules alimentés en hydrogène. Les avions, les locomotives, l'équipement de mine et de construction et les véhicules routiers spéciaux pourraient à ce titre présenter de l'intérêt.

Afin que la mission donne des résultats, le Canada *doit* absolument se doter d'un programme de développement des technologies et des produits consommateurs d'hydrogène pur. Il faudrait en premier lieu analyser et chiffrer les avantages comparés de plusieurs produits cibles. Comme objectif, on devrait retenir au moins deux véhicules alimentés en hydrogène, choisis parmi les types suivants : avion de reconnaissance, locomotive, véhicule de transport routier ou équipement de mine, de foresterie et de construction. Le choix devra se faire selon leur valeur en développement technologique et leur potentiel de vente, et les projets devront être poussés jusqu'à l'étape de la démonstration. Le stockage de l'hydrogène à bord des véhicules est une technologie fondamentale. Même s'il est trop tôt pour retenir des objectifs particuliers, nous avons retenu trois possibilités prometteuses :

- Des locomotives à piles à combustible à l'hydrogène feraient d'excellentes cibles de développement technologique, stimuleraient l'industrie canadienne des locomotives, permettraient le développement d'une industrie canadienne des piles à combustible et laissent espérer un succès commercial sur les marchés canadien et étranger.
- Des véhicules routiers urbains spécialisés alimentés en hydrogène pourraient présenter des avantages uniques pour l'environnement et les usagers, introduiraient une infrastructure de ravitaillement en hydrogène et seraient tout indiqués pour percer sur l'immense marché des véhicules routiers.
- Un avion de reconnaissance approvisionné en hydrogène à partir de deux bases stratégiques offrirait des avantages opérationnels, stimulerait l'industrie aérospatiale canadienne et pourrait contribuer énormément à la souveraineté et à la défense nationales.

Nous ne saurions trop insister sur l'importance de mettre au point des produits alimentés en hydrogène, véritable talon d'Achille du Canada sur le plan de la concurrence.

5. Applications axées sur l'autonomie énergétique locale

Même si nous ne les avons pas explicitement mentionnées dans le sommaire, il existe une autre catégorie de technologies de l'hydrogène. Leur importance ne repose pas tellement sur la valeur qu'elles représentent sur le marché, mais plutôt sur leur capacité d'améliorer la qualité de la vie dans les régions du Canada (et du monde) où les infrastructures d'acheminement de l'électricité et des combustibles n'existent pas encore ou coûtent cher à installer et à entretenir. Dans ces régions, il serait peut-être judicieux d'utiliser de plus petites sources d'énergie (solaire, éolienne ou petits barrages hydroélectriques). Ce marché particulier sera caractérisé par des technologies où l'efficacité aura été sacrifiée à la faiblesse des immobilisations et à la facilité d'exploitation. Ces systèmes ne seront pas raccordés aux grandes infrastructures énergétiques; leur parfaite autonomie les rendra intéressants. Plusieurs des petites sources d'énergie sont handicapées par une dissymétrie de l'offre et de la demande, de sorte que l'on doit accumuler l'énergie en réserve. Le stockage de l'hydrogène pourrait être une solution.

En plus d'offrir un moyen éventuel de stocker l'énergie électrique, l'hydrogène peut aussi permettre l'utilisation des sources locales pour produire des carburants destinés, par exemple, à des tracteurs.

3.3 LE CHOIX DU PROGRAMME

Le Comité consultatif a reçu pour mandat de cerner le potentiel de l'hydrogène, plutôt que de l'étudier à fond. En parler, cependant, sans préciser quelles sont ces possibilités pourrait teinter le rapport de relents doctrinaux, vagues ou abstraits. Cette section, de même que l'annexe A.1, présente des suggestions concrètes, étayées d'exemple précis. Il ne faudra pas en conclure, toutefois, que l'éventail des choix s'arrête là.

Afin de se faire une idée des possibilités de l'hydrogène au Canada, le Comité consultatif a examiné un ensemble de projets classés dans deux grandes catégories : **l'intégration des ressources**, et les **produits consommateurs d'hydrogène**. Il n'était pas tant question de les décortiquer que d'avoir une vue d'ensemble des applications. Cet exercice exigeait toutefois que nous retenions quelques détails. Le tableau final que l'on obtiendra si la mission nationale que nous proposons est menée à bon terme pourra varier dans le détail; mais il devrait, dans ses grandes lignes, ressembler à celui que nous envisageons actuellement.

On trouvera notamment à l'annexe A.1 un "programme modèle", ainsi qu'une brève description des projets et trois tableaux qui présentent les concordances du programme (tableau 2), les critères de sélection et les besoins quinquennaux de dotation (tableau 3), de même que les réalisations escomptées et l'échéancier (tableau 4).

Critères de sélection du programme

Le Comité consultatif a utilisé plusieurs critères pour choisir les composantes d'un programme national de l'hydrogène. Bien que l'exacte définition de ces composantes soit laissée aux soins de l'Agence canadienne de l'hydrogène (les recommandations et le rôle de l'ACH sont présentés dans la section 3.4), on peut considérer ce qui suit comme des points de départ.

Maturité technologique

Tous les projets proposés devraient être classés, selon leur stade d'évolution technologique, dans les catégories : embryonnaire, naissante ou établie. Ce mode de classement, expliqué à la page 2 du présent rapport, suggère au gouvernement des moyens de décider quand intervenir et quand laisser l'industrie se débrouiller seule pour trouver des débouchés commerciaux.

Le pourcentage du marché utilisé pour définir la transition de l'état embryonnaire à l'état naissant comporte une part d'arbitraire. Ce qui importe, c'est le principe plus que la proportion exacte. Il est d'ailleurs difficile de fixer des parts de marché, lorsque celui-ci peut comporter de nombreux éléments. Par exemple, considérons le marché des piles à combustible. En tant que sources d'énergie de la navette spatiale, les piles à combustible détiennent le monopole, alors qu'au sens général, elles occupent une proportion infime du marché. On doit donc examiner avec prudence l'utilisation de la part du marché comme critère de classification.

Retombées économiques

Dans certains domaines, les industries existantes peuvent élargir leur gamme de produits et de services de façon à y inclure des projets particuliers faisant appel à l'hydrogène – et carrément en profiter.

Ailleurs, il n'existe pas d'industries convenant à des projets particuliers. Par exemple, il n'existe pas au Canada de fabricant de piles à combustible, pas plus qu'il n'existe de société industrielle adaptée à ce genre de production. Il faut imaginer des mécanismes qui permettront soit de créer de

nouvelles industries soit d'encourager les industries existantes à fournir des produits jusqu'ici fabriqués à l'étranger. Un programme rationnel d'acquisition de matériel de défense ou d'équipement ferroviaire ou minier pourrait être utile au gouvernement pour favoriser l'établissement de ces nouvelles industries.

Enfin, dans d'autres domaines, il est difficile de préciser quel secteur ou quelle industrie bénéficierait d'avantages économiques. Les avantages résultant des routes, des canaux ou des relevés géologiques sont répartis entre de nombreuses personnes. La construction de gazoducs pour l'hydrogène profitera au constructeur, mais elle créera aussi une infrastructure en avantant bien d'autres. Les codes de sécurité ne rapportent rien de particulier à ceux qui les élaborent mais ils établissent des normes très précises de conception et d'utilisation des produits, sans oublier qu'ils préviennent les accidents.

Sans cette incitation, l'industrie développerait-elle tout de même la technologie ?

Les industries sont les mieux placées pour juger de l'à-propos de mettre au point de nouveaux procédés et de lancer de nouveaux produits lorsqu'elles entendent préserver leur part de marché. Les deniers publics ne devraient pas servir à financer de la recherche dont l'industrie s'acquitterait de toutes façons, sans compter que les entreprises ont déjà accès à des stimulants fiscaux appuyant la R-D. Ils devraient plutôt être consacrés à la R-D que les industries n'entreprendraient pas sans aide spéciale.

C'est ainsi qu'ont été développées la plupart des technologies de pointe, comme l'aviation et l'informatique, d'autant plus si elles imposaient une période de démarrage de plus de 5 à 10 ans.

La position concurrentielle du Canada

Le Canada pourrait avoir, pour certains produits et procédés, un net avantage; par contre, il pourrait profiter de ce que certains pays planifient mal le développement. Il arrivera aussi que le Canada soit au départ désavantagé mais qu'il puisse y remédier, en y mettant le prix, sans oublier qu'avec son entreprise de l'hydrogène, il pourra compter sur un lucratif marché intérieur.

Les coûts de développement

Il est actuellement impossible de quantifier les coûts totaux du développement. Il n'en est pas moins important de connaître plusieurs de leurs caractéristiques. D'abord, le coût total d'un groupe de projets peut être moindre que la somme des coûts individuels, à cause de la synergie des projets. En outre, l'ACH peut choisir parmi plusieurs projets et décider de retenir les plus prometteurs. Donc, lorsqu'on planifie la recherche par projet, par domaine et par programme, le coût total des projets est toujours plus grand que celui du domaine, et le total pour les domaines, toujours plus grand que celui du programme (tableau A3).

Les priorités

- "Essentiel" : Un programme national d'hydrogène serait incomplet sans un effort soutenu pour développer les technologies ou les produits regroupés sous cette classification.
- "Très important" : Un programme national serait gravement compromis en l'absence de ces projets, mais il pourrait tout de même se passer de quelques-uns d'entre eux.
- "Important" : Il convient d'étudier la faisabilité des projets regroupés sous cette rubrique. Un nombre raisonnable, disons la moitié, devrait être poursuivi avec les plus grands efforts.

Nombre des possibilités qu'offre l'hydrogène n'entrent pas dans ces catégories de priorité. Par exemple, il serait possible de fabriquer de l'ammoniac, d'utiliser l'hydrogène obtenu comme sous-produit de certains procédés industriels et de vendre de l'hydrogène liquide au Centre spatial

Kennedy. Les marchés sont déjà bien établis (l'hydrogène occupe à la fois tout le marché du combustible liquide pour la navette spatiale et tout le marché de l'ammoniac). Quoique ces activités doivent être encouragées, il n'est pas nécessaire que l'Agence canadienne de l'hydrogène (ACH) s'associe de près à ces entreprises commerciales. Le Conseil de l'industrie de l'hydrogène est l'intervenant tout trouvé pour promouvoir les applications industrielles de l'hydrogène, et l'on peut s'attendre à ce qu'il collabore avec l'ACH, lorsqu'il jugera le moment venu.

Définition des objectifs

On définit souvent les objectifs selon des intervalles précis, de 5 ans par exemple, ce qui fixe les échéances à 5, à 10 ou à 15 ans. En raison de la polyvalence du programme national de l'hydrogène, l'ACH aura avantage à fixer des objectifs selon les cheminements individuels, plutôt qu'à échéances fixes. Ce qui revient à dire que, lorsqu'un produit ou un procédé atteindra une nouvelle étape d'évolution, on pourra considérer que l'objectif est atteint. Ainsi encadrés à plus long terme, les échéances et les critères habituels de gestion s'appliqueraient.

Un exemple de mission nationale de l'hydrogène

L'annexe A.1 donne les grandes lignes de ce que le Comité consultatif considère un forme acceptable de mission nationale de l'hydrogène. Le lecteur pourra comprendre dans quel dilemme était enfermé le Comité. Il ne convenait pas de faire des recommandations explicites sur des projets particuliers, qui auraient pu être institulés sans plus d'examen. Par contre, plusieurs de ceux qui ont été examinés méritaient qu'on s'y arrête et pouvaient, en outre, servir de points de départ à l'ACH.

3.4 LE MENEUR DE JEU : L'AGENCE CANADIENNE DE L'HYDROGÈNE

Une fois établi le mérite de la mission, encore fallait-il voir à sa gestion.

Par crainte de l'alourdir et de la bureaucratiser, les membres du Comité hésitaient beaucoup à proposer la création d'un organisme. Il fut décidé, néanmoins, après de longues délibérations, de recommander la fondation d'une petite agence canadienne de l'hydrogène, qui aurait pour unique responsabilité de *s'assurer que les Canadiens réalisent pleinement, aujourd'hui comme demain, toutes les promesses de l'hydrogène.*

Voici comment s'explique cette décision :

- Il est essentiel que l'orientation soit donnée par une organisation dont l'*unique* tâche est d'assurer le succès de la mission. Procéder autrement en compromettrait la réalisation.
- Pour éviter les conflits d'intérêts organisationnels et financiers, l'agence doit absolument se tenir à distance de l'exécution des projets et des intérêts des groupes exécutants. Bien que l'agence doive maintenir des rapports étroits et fructueux avec tous les secteurs touchés – le milieu du travail, l'industrie, le monde scientifique, etc. – la définition des objectifs de la mission ne doit pas être laissée aux *seuls* exécutants.
- L'organisation doit identifier les industries, les technologies et les personnes dont l'absence pourrait faire obstacle à la réalisation de produits ou d'initiatives qui exigent la concertation et à l'atteinte d'objectifs nationaux. On ne peut raisonnablement s'attendre à ce que l'industrie le fasse lorsque ces vides se manifestent en dehors de sa sphère de production ou d'affaires.
- L'organisation doit donner une impulsion dynamique à la mission, en assurant elle-même la liaison avec le ministre responsable.

Caractéristiques de l'Agence

On peut dire de l'Agence qu'elle devra être un modèle de vertu politique. Sa crédibilité dépendra de la mesure dans laquelle elle réussira à prendre des décisions éclairées en matière technique tout en énonçant clairement les problèmes, sans verbiage ni simplisme. Par-dessus tout, *elle devra faire en sorte que les bonnes décisions soient prises au moment opportun* et qu'elles s'accordent avec l'esprit des grands objectifs nationaux.

L'Agence devra, pour satisfaire à ces objectifs :

- Sonder et régulièrement prendre le pouls de tous les groupes intéressés du Canada, y compris des organisations de travailleurs, des groupes industriels, de la petite entreprise et des organes scientifiques et financiers.
- Diriger activement la mission, en fait ne pas se contenter de réagir aux suggestions de l'industrie et des institutions.
- S'acquitter du rôle de meneur et de certaines tâches de haute direction. Ses membres devront faire preuve de compétence dans les domaines concernés et connexes et se consacrer avec ardeur et dévouement à leurs tâches.
- Être de taille limitée. Le Comité consultatif recommande que le conseil soit composé de cinq ou six membres, dont deux, au plus, représenteront le gouvernement, et que ce conseil soit assisté par une petite équipe

par une petite équipe d'analyse et de soutien (constituée de membres prêtés à court terme par le milieu des affaires, de l'industrie et de la recherche). S'il était nécessaire d'obtenir des services plus poussés d'analyse et de modélisation, des marchés pourraient être conclus avec des spécialistes.

- Confier à d'autres la gestion générale des projets, en particulier aux exécutants. On utilisera autant que possible les compétences de gestion de l'industrie, des organismes gouvernementaux et des universités.
- Faire rapport au gouvernement du Canada par l'intermédiaire du ministre responsable. L'Agence devra aussi formuler des recommandations et proposer d'autres options au Conseil des ministres.

Les coûts

Durant les cinq premières années, l'Agence devra avoir suffisamment de fonds pour couvrir ses coûts de fonctionnement et pour financer des projets de R-D à petite échelle. Nous évaluons à 50 millions de dollars les besoins durant cette période de démarrage.

Évidemment, afin de jouir de toutes les retombées de cette mission nationale, qui devrait produire des gains économiques de plusieurs milliards de dollars (sans compter des bienfaits environnementaux, pour n'en nommer que quelques-uns), les secteurs public et privé devront prévoir faire, en temps opportun, des contributions supplémentaires, proportionnelles aux objectifs visés. La dotation des programmes d'acquisition et de démonstration à grande échelle se fera en collaboration avec le secteur privé et les organismes touchés par des activités comme la défense ou les transports et avec les provinces.

QUATRIÈME PARTIE : LES AVANTAGES

4.1 LE CARACTÈRE DISTINCT DU CANADA

Nous avons fait ressortir, au début du rapport, deux composantes du rendement économique. Si l'importance de la productivité est acquise, celle de l'originalité reste peut-être à démontrer.

L'originalité, ici, est carrément fonction de la mesure dans laquelle un pays réussit à ce différencier des autres, surtout lorsqu'il a la sagesse de l'appuyer sur l'histoire, le tempérament et la richesse de son peuple. Outre de consolider ses avantages, elle lui permet, entre autres nombreuses choses, d'accéder à un sommet d'excellence et d'être *perçu* comme tel. Pour parvenir à franchir, le premier, le seuil de l'hydrogène, le Canada doit remporter la course au développement et à la commercialisation de technologies et de produits essentiels, c'est-à-dire miser sur l'unicité *actuelle* de son capital énergétique pour acquérir une originalité *nouvelle*, fondée sur les techniques de pointe de l'hydrogène.

Il devra aussi privilégier, le premier, l'éclosion de nombreux produits déjà en gestation qui, de ce fait, connaîtront une évolution rapide. La croissance des marchés devrait alors se charger de faire baisser le coût de l'hydrogène, à mesure que se développeront les infrastructures, accélérant par la même occasion l'adoption des produits. Le Canada se sera de la sorte déjà imposé comme fournisseur par excellence des produits et du savoir-faire lorsque les autres chercheront à l'imiter. Voici comment il devrait s'y prendre :

- Il peut, étant donné l'unique connaissance qu'il a de l'avenir de l'hydrogène, s'en approprier les technologies.
- Dès lors, il est à même d'utiliser et de commercialiser les techniques et de récolter les fruits de sa prévoyance.

Les trois sections qui suivent font l'exposé des avantages escomptés.

4.2 UN ENVIRONNEMENT PROPRE

Au début de siècle, l'éclairage électrique a remplacé les lampes à pétrole et au gaz. Le coût n'était pas moindre. Au contraire, seules quelques demeures cossues l'utilisaient. Ni le gaz ni le pétrole lampant ne manquaient.

Cette victoire de l'ampoule électrique marquait un tournant de l'histoire de l'éclairage. Le nouveau procédé, plus propre et moins dangereux, améliorait la qualité du milieu de vie. Encore aujourd'hui, il existe *deux* façons de réduire la pollution :

- *Abandonner* le procédé qui engendre le polluant.
- Installer un dispositif qui *absorbe* le polluant.

Quant on veut dépolluer, on pense la plupart du temps à éliminer le polluant. Plus souvent qu'autrement, il est préférable de changer le procédé.

Le nouveau procédé a aussi l'avantage d'être plus efficace. Par exemple, si une lampe à pétrole souille les tentures du salon, il vaut mieux installer l'éclairage à l'électricité que d'empêcher la lampe de produire de la suie.

Le remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène représente aussi un changement de procédé; l'environnement ne peut qu'y gagner. Souvent, c'est la meilleure façon de dépolluer, parfois la seule.

L'environnement profitera de l'introduction de l'hydrogène à quatre niveaux : dans certaines installations, en milieu urbain, à l'échelle du continent et sur toute la planète.

Les milieux propres à certaines installations

Les véhicules et les machines alimentés en hydrogène sont particulièrement avantageux dans des espaces clos, comme des mines souterraines, des entrepôts, des usines ou des centres sportifs. On y utilise actuellement des moteurs à essence ou au diesel qui requièrent de coûteux investissements en systèmes de ventilation, ce qui n'empêche pas l'air d'être souvent vicié. L'emploi d'équipement à l'hydrogène, pour gratter et arroser la glace des patinoires intérieures, et de véhicules à l'hydrogène, dans les mines, ne sont que deux exemples de technologies qui pourraient assainir des milieux propres à certaines installations.

Le milieu urbain

La plus grande source de pollution des centres urbains est généralement le véhicule. La qualité de l'air des villes pourrait être améliorée si les véhicules à l'hydrogène étaient introduits. Leur usage sera limité d'ici la fin du siècle. Par la suite, cependant, peut-être pourront-ils transformer l'environnement urbain. Ils seront précédés par des véhicules de transition, mus par des carburants à rapport H/C élevé comme le propane et le méthane, qui pourront apporter des améliorations. L'hydrogène peut aussi contribuer à réduire les émissions nocives des usines dans les villes. Par exemple, l'utilisation d'hydrogène plutôt que de coke comme agent réducteur dans les hauts fourneaux pourrait "blanchir" les centres de sidérurgie.

Le continent

L'émission des substances responsables des *pluies acides* a des répercussions défavorables sur tout le continent. On en admet de plus en plus les méfaits tant pour l'environnement que pour l'économie. L'utilisation de l'hydrogène produit sur place dans des procédés industriels contribue déjà beaucoup à réduire les émissions. Par exemple, l'hydrogène est crucial pour désulfurer les matières premières de la pétrochimie. À mesure qu'il s'imposera comme combustible principal et comme substance adaptée aux procédés industriels, il sera possible d'éliminer presque totalement les pluies acides. Toute combustion à forte température, en présence d'air, peut donner comme sous-produit des oxydes d'azote, que l'on sait être à l'origine de pluies acides. La combustion de l'hydrogène de fait pas exception. Par contre, des études de Lockheed et de Daimler-Benz ont montré que la grande facilité d'inflammation des mélanges hydrogène-air permet d'éliminer une grande partie de ces sous-produits.

La planète

Le problème environnemental peut-être le plus pressant auquel fait face notre planète est l'accélération du taux d'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère. Bien que l'avantage de l'hydrogène aux trois autres niveaux puisse être décrit dans ses moindres détails, le Comité consultatif a décidé de se concentrer sur l'environnement de la planète. Cette décision n'est pas tant due à l'importance du CO_2 dans l'atmosphère qu'au désir d'illustrer, dans ses grandes lignes, l'avantage quasi universel de l'hydrogène.

L'environnement de la planète n'a jamais été aussi menacé. L'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère, qui cause l'effet de serre, laisse craindre à long terme un réchauffement du globe. Pourtant, ce sont les répercussions sur les climats régionaux qui suscitent le plus d'inquiétude pour les prochaines décennies. Comme exemple du phénomène, mentionnons l'assèchement progressif des terres d'une grande partie du centre de l'Amérique du Nord qui est prévu et qui accélérera l'apparition de déserts et, à plus long terme, causera une baisse du niveau des Grands Lacs. Il aura donc des conséquences sur la navigation et perturbera énormément l'agriculture nord-américaine, déjà aux prises avec de grandes difficultés⁺.

L'augmentation du CO_2 est d'abord attribuée à l'utilisation d'énergies fossiles. Puisque les plantes transforment le CO_2 en carbone, un des effets de la disparition des forêts sera d'en ralentir l'absorption et, donc, d'aggraver les effets de la combustion d'énergies fossiles. De plus, l'augmentation des taux de libération dans l'atmosphère de plusieurs autres gaz formés par l'activité industrielle intensifiera l'effet de serre.

C'est à dessein que nous avons affirmé que la planète n'avait jamais été autant menacée. Le réchauffement des climats pourrait devenir irréversible dès le début de siècle prochain. C'est ce caractère d'irréversibilité qui distingue le CO_2 des autres polluants, comme les pluies acides ou les vapeurs cancérigènes. Nous pouvons à loisir mettre fin aux pluies acides ou aux vapeurs en arrêtant les émissions. L'effet de serre est différent parce que, au delà de certaines limites, même l'adoption hâtive (et vaine) de mesures correctives, comme l'interdiction immédiate de toutes les émissions de CO_2 de provenance fossile, ne pourra stopper le processus de réchauffement. Un de ces seuils pourrait bien être atteint lorsque se mettront à fondre les glaces du Pôle nord, sous l'effet d'une réduction de l'albédo terrestre (l'albédo mesure la fraction du rayonnement solaire incident réfléchi dans l'espace).

⁺ Les transformations climatiques saperont les infrastructures existantes bien avant la fin de leur vie utile. Par exemple, on estime que plusieurs centaines de millions de dollars de production hydroélectrique seront perdus annuellement, à cause de la diminution des débits d'eau.

Une des principales recommandations du Comité consultatif est de stimuler le développement de systèmes de production d'énergie qui intègrent diverses sources. Un des avantages de l'intégration réside dans la conservation du carbone et dans une diminution des émissions de CO₂, attribuables à la substitution de l'hydrogénation au rejet du CO₂. Pour montrer comment le choix du procédé et le schéma d'intégration peuvent diminuer les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, trois exploitations possibles, d'une capacité individuelle de 735 TJ/j (environ 120 000 b/j) de brut synthétique dérivé de sables bitumineux, ont été étudiées afin d'estimer le tonnage quotidien de CO₂ rejeté dans l'atmosphère+. Voici les résultats :

Usine 1 : Le charbon comme combustible d'apport, affinage par craquage thermique

Substances	TJ/j	t/j
Charbon (introduit)	305	20 300
Bitume brut (introduit)	915	22 400
Brut synthétique (produit)	735	17 000 ⁺
CO ₂ émis (produit)	—	44 600

Usine 2 : Le gaz naturel comme combustible d'apport, affinage par hydrocraquage

Substances	TJ/j	t/j
Charbon (introduit)	293	5 450
Bitume brut (introduit)	825	20 200
Brut synthétique (produit)	735	17 200 ⁺
CO ₂ émis (produit)	—	20 900

Usine 3 : Électricité et vapeur produite en chaudière nucléaire comme sources externes d'énergie, affinage par hydrocraquage

Substances	TJ/j	t/j
Vapeur et électricité (introduites)	130(v) 112(é)	—
Bitume brut (introduit)	825	20 200
Brut synthétique (produit)	735	17 200 ⁺
CO ₂ émis (produit)	—	6 400

TJ/j : Térajoules par jour (1 TJ = 3 millions de kWh = 160 barils de pétrole)

t/j : Tonnes par jour (1 tonne = 2 000 livres métriques = 908 kilogrammes)

⁺Les tonnages différents de brut synthétique pour une même teneur en énergie résultent d'une légère différence de composition chimique des produits.

+ Ces résultats ont d'abord été publiés dans un document de E. J. Wiggins traitant des perspectives qu'offrent les sables bitumineux de l'Alberta et présenté lors de la conférence sur les débouchés énergétiques, tenue à Edmonton en avril 1982. Cette conférence avait été organisée par le ARTSPA et l'Institut des systèmes à hydrogène. Les données actuelles résultent d'une amélioration des données initiales; elles ont été transmises au Comité consultatif par M. Wiggins lui-même.

Dans le premier procédé, le CO₂ rejeté dans l'atmosphère vaut presque trois fois, en tonnage, le produit recherché, c'est-à-dire le brut synthétique.

Dans le deuxième procédé, le tonnage de CO₂ est encore plus important, même s'il égale moins de la moitié de celui du procédé 1.

Dans le troisième procédé, le tonnage de CO₂ vaut à peine plus du tiers du tonnage de brut synthétique. Dans ce procédé, on utilise à la fois l'hydrogène de l'électrolyse et l'oxygène pour obtenir plus d'hydrogène par oxydation partielle (OXP).

En principe, le sous-produit de CO₂ rejeté dans l'atmosphère *pourrait être éliminé* si tout l'hydrogène ajouté provenait directement de l'électrolyse et si l'on transformait les goudrons, les substances volatiles et les gaz secondaires en liquides tout en brûlant l'hydrogène électrolytique dans des chaudières à combustible. L'oxygène ainsi produit pourrait être rejeté dans l'atmosphère ou réutilisé dans d'autres procédés industriels.

L'effet de serre est important à un autre titre. Le climat est un phénomène soumis à des variations. Par exemple, si une région du monde connaît une saison anormalement sèche, il est difficile de savoir s'il s'agit d'une simple anomalie ou d'un changement climatique à long terme.

Les savants sont unanimes : des changements correspondant aux conséquences prévues de l'effet de serre sont maintenant constatés, *en sus* des variations climatiques normales. En d'autres mots, des millions d'êtres humains pourraient mourir de faim, si une sécheresse cyclique de deux ou trois ans venait aggraver la baisse généralisée des précipitations due à l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère. Les probabilités qu'un tel phénomène sévisse en certains points du globe d'ici à la fin du siècle sont évaluées à 50 %, par certains. Un cataclysme du genre nous secouerait de notre torpeur. Désormais conscients de l'effet de serre, nous comprendrions que des sécheresses à la fois plus fréquentes et plus *prononcées* sont inéluctables, de quoi provoquer une véritable volonté d'action politique mondiale.

En résumé

L'hydrogène contribuera à assainir le monde. Il fera bon vivre dans nos villes. Les forêts et les lacs seront sauvegardés. Le milieu de travail sera plus sain et les complexes récréatifs, plus salubres. Quant à stopper l'effet de serre, l'hydrogène n'est pas seulement une solution à nos problèmes environnementaux; il est le seul moyen utile dont nous disposons pour éviter une catastrophe universelle.

4.3 CROISSANCE INDUSTRIELLE ET CRÉATION D'EMPLOIS

Au risque de nous répéter, rappelons que la planification, bien qu'elle comporte toujours une certaine part d'inconnu, se fait rarement dans l'ignorance la plus totale. Ainsi, nous pouvons tirer profit de notre connaissance de l'hydrogène. D'où le raisonnement qui suit.

Les gouvernements ont toujours une bonne raison de ne pas prendre d'initiatives : leur coût. Certaines, cependant – celles qui assureront une prospérité à long terme – rapporteront à la longue, moyennant un déboursé immédiat. Il devient alors difficile d'évaluer le rendement qui justifie un tel investissement.

Nous avons recommandé la mise sur pied d'une mission nationale de l'hydrogène parce que nous croyons que nous en retirerons des profits énormes. Par rapport à la richesse qui sera créée, les investissements requis sont faibles, du fait surtout que les technologies en sont au premier stade de développement. La rentabilité résulte aussi du fait que la mission s'appuiera sur une évolution industrielle déjà amorcée. Cet investissement est le prix qu'il faut payer pour dominer. Le gain est important pour le pays puisqu'il accomplira, ainsi, nombre des tâches qu'il aurait eu à entreprendre de toutes façons, comme l'amélioration de son secteur des transports, la consolidation du secteur des ressources et la sauvegarde de l'environnement.

Surtout, le rendement élevé dépendra du degré de succès. Un des objectifs sera de faire percevoir le Canada comme meneur dans le domaine de l'hydrogène. Si nous y arrivons, nous multiplierons nos dividendes.

Les Canadiens savent à quel point la dette nationale ralentit la croissance. La réduction des dépenses est une solution. La création de richesses en est une autre. Une mission de l'hydrogène serait source d'une grande prospérité, à relativement peu de frais. Elle représente, à ce titre, un investissement crucial dans l'avenir du pays.

La création d'emplois

Pour conserver son avance, un pays doit faire appel aux meilleures technologies qui soient et, de la sorte, maintenir et accroître l'emploi. Une mission nationale de l'hydrogène sera source de technologie et d'emploi dans presque tous les secteurs, y compris dans les industries de base, dans la production et la distribution d'électricité et, ce qui est peut-être plus important, dans de nouvelles entreprises manufacturières.

L'introduction de technologies nouvelles crée parfois des perturbations locales de l'emploi qui, si elles pèsent peu en regard des avantages à plus long terme, sont néanmoins d'une importance capitale pour ceux dont le gagne-pain est menacé. Nous recommandons que l'Agence canadienne de l'hydrogène s'efforce, en étroite collaboration avec le monde du travail, de bouleverser l'emploi le moins possible.

On s'attend à ce que la mission crée des emplois stables, dans des milieux de qualité. Elle ne pourra prévenir les licenciements dans les industries déjà en perte de vitesse. Lorsqu'il y aura moyen, cependant, elle pourra canaliser une grande partie de cet emploi vers les collectivités les plus durement frappées.

Utilisation des ressources en hydrocarbures

Une mission nationale améliorerait l'efficacité d'utilisation de nos ressources en hydrocarbures, en particulier des sables bitumineux d'Athabasca. Non seulement les technologies utilisées pour traiter ces réserves feraient davantage appel aux biens et services canadiens, mais les procédés utilisés pour la fabrication de bruts synthétiques seraient plus *souples*. Cette flexibilité se manifesterait de deux autres façons : les systèmes de production intégrée ou polyvalente s'adaptent plus facilement à la demande ou aux aléas de la production, et on disposerait d'un plus large éventail de techniques de traitement. Elle représenterait ni plus ni moins un *écran de protection* de la production canadienne contre les aléas politiques, environnementaux ou technologiques.

Il se peut aussi que des événements géopolitiques bloquent les importations de pétrole en Amérique du Nord. Si la technologie d'exploitation à grande échelle de ses sables bitumineux est déjà en place, le Canada pourrait alors développer d'importants marchés de brut synthétique aux États-Unis. De plus, nos réserves d'énergie peuvent effectivement être mises à contribution et s'avérer utiles dans les négociations avec nos partenaires commerciaux.

Utilisation des capacités de production d'électricité

Le Canada pourrait produire beaucoup plus d'électricité. Bien des provinces n'exploitent pas tout leur potentiel hydroélectrique parce que la demande y est trop faible. Ailleurs, par exemple en Ontario, où presque toutes les ressources hydrauliques sont déjà utilisées, on se tourne vers le nucléaire. N'empêche que la capacité de production croît beaucoup plus vite que la demande d'électricité, qui est son seul débouché.

Une mission de l'hydrogène pourrait avancer la date à laquelle cette capacité pourrait être mise au service de l'industrie chimique. Les projets hydroélectriques du nord du Québec, du Labrador, du nord-est du Manitoba et de la Colombie-Britannique pourraient en profiter. L'Ontario pourrait rentabiliser davantage ses centrales CANDU, s'il intégrait cette capacité croissante à son énorme base industrielle – en s'inspirant peut-être de l'infrastructure mise en place par Hüls dans la vallée de la Ruhr pour construire des pipelines de transport de l'hydrogène.

Exportation de technologies et de savoir-faire

Fort de ses acquis, le Canada pourrait vendre son savoir-faire aux pays qui souhaitent exploiter leurs pétroles lourds. Par exemple, il pourrait aider le Venezuela à mettre en valeur ses importantes réserves de sables bitumineux, qui ont beaucoup en commun avec les dépôts d'Athabasca. Grâce au développement de méthodes utilisant l'hydrogène non fossile, le Canada pourrait conclure des ventes importantes avec le Venezuela (qui n'a pratiquement pas de gaz naturel, mais compte de vastes ressources hydrauliques, voisines de ses pétroles lourds).

Le Brésil dispose à Itaipu de très grandes réserves hydrauliques. Elles se trouvent cependant dans une région éloignée, coupée des centres industriels et des villes. De cette énergie hydraulique, on pourrait titrer de l'hydrogène qui serait expédié par rail ou par gazoduc vers d'autres régions où il servirait à produire du méthanol à partir de biomasse, ce qui relèverait de beaucoup le rendement de celle-ci, comparativement au procédé actuel de production d'éthanol.

Exportation d'hydrogène

À plus long terme, l'hydrogène produit à partir des sources électriques fera l'objet d'un commerce mondial. Si le Canada met au point les technologies et le savoir-faire, le moment viendra peut-être où il pourra en expédier par navires-citernes, de la côte Est vers l'Europe ou de la côte Ouest vers les pays du Pacifique. Des pipelines le relieraient aux marchés des États-Unis.

Parallèlement, l'énorme capacité hydraulique de pays comme le Zaïre peut, grâce aux technologies de l'hydrogène, se capter un marché mondial. S'il a su mettre au point des technologies pour la production, la liquéfaction, l'expédition et le stockage de l'hydrogène, le Canada pourra ainsi non seulement exporter sa propre électricité, sous forme d'hydrogène, mais aussi fabriquer l'équipement qui permettra à d'autres pays de livrer de l'hydrogène aux quatre coins du monde.

Développement régional

La mission de l'hydrogène ne saurait souffrir des contraintes régionales. Par contre, elle peut certes contribuer au développement des régions. D'une part, elle peut s'inspirer de particularités propres à chaque province et territoire tout en les mettant en valeur. D'autre part, ses composantes, si elles ne dépendent pas d'un lieu précis, pourront être réparties de manière à avantager les programmes de développement régional. Il suffit de rappeler des réserves hydrauliques du Labrador et de la baie James, le charbon de l'Île du Cap-Breton, qui pourrait être transformé en carburant, et le potentiel des côtes de la Colombie-Britannique. Autant que possible, la mission devrait chercher à conforter les économies régionales les plus affectées par une baisse d'activité industrielle.

Maintien des secteurs technologiques bien établis

L'hydrogène peut mieux asseoir les secteurs de l'hydroélectricité et des pétroles lourds. Les secteurs hydraulique et nucléaire du Canada pourraient aussi en profiter. La recherche de moyens d'adapter la production d'électricité à celle des combustibles et des produits chimiques, soit à l'affinage des pétroles lourds dans les régions sans gaz naturel soit à la production directe d'hydrogène, devrait être centrale à la mission. Les industries hydraulique et nucléaire du Canada pourraient contribuer énormément au développement de l'hydrogène.

Aujourd'hui, lorsqu'il cherche à vendre des CANDU à l'étranger, le Canada doit rivaliser avec d'autres pays dont les réacteurs sont destinés au même marché, soit la production d'électricité. Le CANDU est un des meilleurs réacteurs du monde. Cependant, la concurrence est très vive. Si un programme dynamique était entrepris pour adapter le CANDU à l'industrie chimique, on pourrait en faire, dans dix ans, le seul réacteur qui puisse servir à cette fin. Au XXI^e siècle, les réacteurs allemands à haute température et d'autres pourraient bien lui faire concurrence. Mais on gagne toujours à être premier.

4.4 RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

Le Canada a la plus mauvaise note du monde industrialisé en recherche et en développement. Certes, il peut se vanter de certains succès qui ont attiré l'attention sur ceux qui en étaient responsables mais, à toutes fins utiles, il s'est laissé devancer. Peut-être la nature a-t-elle été trop généreuse à l'endroit des Canadiens, qui n'avaient qu'à récolter les moissons de la terre et à cueillir ses nombreuses richesses. La plupart des peuples peuvent désormais se passer d'importations alimentaires (de sorte que les pays exportateurs se livrent à la guerre des prix); les tarifs à l'importation de produits de la forêt sont à la hausse; le prix mondial des minéraux (potasse, cuivre et nickel) recule : autant de signes que nous assistons à une mutation et que tout ne sera pas aussi facile qu'auparavant. Le seul espoir véritable réside dans l'innovation technologique.

Ce n'est pas que l'on n'en parle pas. Les discours officiels et les allocutions publiques retentissent de professions de foi de l'importance de la recherche et de l'innovation technologique pour l'avenir du Canada. Chaque nouveau gouvernement a sa propre recette pour faire, qui du Canada, qui de sa province, un meneur mondial dans le domaine technologique. On fait même quelques tentatives sérieuses. Mais l'enthousiasme fait vite place au désillusionnement à mesure que les crédits d'impôt à la recherche tiennent lieu d'échappatoires fiscales. La persévérance et la poursuite d'objectifs à long terme sont le moteur d'une évolution technologique efficace. Trop souvent des initiatives sont abandonnées lorsqu'il y a changement de pouvoir, le nouveau gouvernement ayant sa propre conception de la façon dont il faudrait encourager la R-D au Canada.

La difficulté peut être d'origine structurelle. Il n'y a pas, au Canada, de concertation nationale en matière de recherche et de développement. Quelques pays, comme les États-Unis, se donnent des objectifs nationaux, comme la conquête de l'espace ou la défense nationale. D'autres, comme le Japon, ont un objectif de survie économique (ils ne disposent pas de ressources naturelles suffisantes). D'autres encore, comme l'Allemagne ou la France, offrent une structure industrielle plus diversifiée, où la recherche, le développement et l'innovation sont un moteur de croissance économique. À ceux qui seraient tentés d'invoquer la sempiternelle excuse du "manque de clientèle pour ce type de produits", nous rappelons que la balance commerciale de la Suède se compare avantageusement à celle du Canada, pour ce qui est de la haute technologie; ce pays ne compte pourtant pas plus d'habitants que l'Ontario. En fait, on constate une *baisse* de la R-D au Canada, depuis deux décennies, due à la fermeture ou à la réduction du financement des laboratoires industriels et des instituts publics de recherche et de développement.

Tout objectif national qui ferait augmenter les ressources du pays en R-D serait *on ne peut plus* utile pour inverser cette tendance. Loin d'une panacée, car il faut beaucoup de temps et d'efforts pour changer les habitudes d'un peuple, il constituerait tout de même un premier pas *important* dans la bonne direction. De plus, les avantages que nous en retirerions *ne se mesureraient pas uniquement aux sommes accumulées*.

Une mission canadienne de l'hydrogène destinée à développer des produits uniques fournirait un point de convergence à la R-D nationale. Toutes les disciplines des sciences physiques (génie, physique et chimie) seraient d'un apport utile. De plus, un programme centralisé de R-D ferait appel aux plus grands cerveaux des universités et des laboratoires du Canada, mettant ainsi un terme à l'émigration et au gaspillage de nos meilleurs talents.

Des crédits d'impôt à la recherche, de nouveaux programmes conjoints d'investissement dans la recherche industrielle et universitaire et la reconnaissance publique de l'importance de la R-D pour le bien-être national ne donneront des résultats que *s'ils ont un objectif précis*, en plein ce que leur fournirait une mission nationale de l'hydrogène.

CINQUIÈME PARTIE : DERNIÈRES RÉFLEXIONS

Énergie et technologie

Depuis le tout début, nous insistons sur la concurrence. Il est très important d'en bien connaître les protagonistes et l'enjeu. Il reste donc un élément à expliquer, pour bien compléter le tableau.

Depuis le début de la révolution industrielle, et en particulier depuis la crise pétrolière des années 1970, le monde est le théâtre d'un affrontement direct entre la *technologie* et l'*énergie*. Or, la technologie prime, au détriment de l'énergie.

Prenons des exemples simples, dont l'automobile. Au cours de la dernière décennie, nous pouvions soit nous contenter des modèles assez primitifs du début des années 1970 soit en améliorer la technologie pour réduire la consommation d'énergie. Résultat : non seulement la voiture s'est-elle perfectionnée, mais elle est aussi plus économe. En ce sens, la technologie l'a emporté sur l'énergie. Dans la construction domiciliaire, de meilleures techniques d'isolation et un chauffage plus efficace ont réduit la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer et climatiser nos maisons. Le phénomène est le même qu'en aéronautique et qu'en électricité. La technologie prend toujours le pas sur l'énergie.

Aussi, lorsque nous planifions une stratégie nationale, devons-nous miser sur l'énergie ou sur la technologie ? Faisons-nous le commerce de l'énergie ou des technologies de l'énergie ?

Il s'agit simplement d'une autre optique de nos recommandations. Nous recommandons un renouveau industriel fondé sur les technologies naissantes. À défaut d'un meilleur qualificatif, nous avons appelé ces dernières les technologies de l'hydrogène. Toutes nos recommandations gravitent autour de la conviction que *nous réussirons* si nous savons nous servir de l'énergie comme base de développement technologique, plutôt que d'importer des technologies pour mettre notre énergie en valeur.

C'est pourquoi il importe tant que nous utilisions nos sables bitumineux comme base de développement des technologies de traitement des pétroles lourds et que nous proposons non seulement notre pétrole mais nos technologies au reste du monde. D'autre part, acheter de l'étranger des technologies afin d'exploiter nos sables bitumineux uniquement pour leur énergie serait jouer perdant et céder à d'autres la base qui leur assurerait la victoire.

Maîtriser l'avenir

Il existe plusieurs facteurs en faveur de l'hydrogène comme mission nationale au Canada. Notons les avantages pour l'environnement, une meilleure utilisation des ressources, l'essor de grandes industries innovatrices et le fait que tous ces facteurs concordent avec l'évolution de l'utilisation de l'énergie dans les pays industriels. Afin de situer ces affirmations, examinons deux scénarios extrêmes :

Dans le premier, l'ère des combustibles fossiles se prolonge indéfiniment, sans souci de l'épuisement des ressources, de l'effet de serre et des autres conséquences sur l'environnement. Nous supposons que, dans un avenir prévisible, le monde utilisera les ressources de charbon, de pétrole et de gaz naturel, sans trop avoir recours aux ressources non fossiles comme l'énergie hydraulique ou nucléaire. Une telle vision sous-entend l'utilisation judicieuse des ressources. Au Canada, il faudrait donc améliorer les techniques, afin de produire des carburants liquides non polluants à partir des pétroles lourds et, peut-être, du charbon, en réservant notre gaz naturel pour la fabrication d'hydrogène.

Donc, dans un monde à jamais voué aux combustibles fossiles, le Canada aurait avantage à s'être déjà engagé dans une entreprise nationale qui le placerait en tête de la production de combustibles liquides à partir de ses grandes réserves fossiles, l'hydrogène étant le principal facteur d'accroissement de ces ressources. De plus, suite à la demande de technologies efficaces, propres

et sûres, de nouveaux produits consommateurs d'hydrogène verront le jour dans des domaines d'application nouvelle (comme l'aérospatiale) pour ensuite s'étendre à d'autres domaines, comme celui des transports. L'existence de ces produits fournira au gaz naturel, meilleure source de H₂DF, le moyen rêvé de percer sur de nouveaux marchés.

Le second scénario est tout à l'opposé : au centre de la géopolitique mondiale, on trouve la question des changements climatiques causés par les émissions de CO₂ dans l'atmosphère, conséquence de la combustion des substances fossiles. Il faut alors abandonner ces substances le plus tôt possible et, entre temps, en brûler le moins possible. Simultanément, nous devons exploiter des sources d'hydrogène non fossiles et mettre au point sans tarder une gamme de nouveaux produits consommateurs d'hydrogène. Encore là, le Canada serait gagnant, tablant sur ses avantages en production non fossile d'électricité et sur l'hydrogène pour fabriquer des combustibles liquides de transition et alimenter les nouveaux produits consommateurs d'hydrogène.

Le Comité consultatif anticipe une évolution plus ordonnée, moins extrême. Toutefois, l'examen des scénarios, tout aussi improbable l'un que l'autre, montre clairement que le Canada, s'il se donnait une mission nationale de l'hydrogène, serait privilégié, peu importe ce que lui réserve l'avenir.

Même si nous ne croyons pas que la raréfaction des ressources ira jusqu'à l'assèchement des puits, la moins grande accessibilité et la baisse de qualité des réserves de combustibles en feront fossiles inévitablement monter le coût. Par ailleurs, tous les faits laissent présager que la Terre se réchauffe sous l'effet du CO₂ en présence dans l'atmosphère, que cet effet s'accélérera et que des pressions se feront sentir pour y mettre un terme. Enfin, loin de croire à un ralentissement de la course aux technologies, nous sommes convaincus qu'elle va s'accélérer.

Une mission nationale de l'hydrogène rapportera beaucoup, si le Canada y met la volonté politique et la persévérance, agrémentées d'une *cohérence* à toute épreuve. Il pourra ainsi intégrer ses ressources efficacement et mettre au point des produits consommateurs d'hydrogène. Au lieu de simplement réagir aux événements, il les aura pris en charge, dans son meilleur intérêt.

Nouveau regard sur les sources d'énergie

Comme nous nous sommes surtout consacrés aux dix ou vingt années à venir, nous avons d'abord considéré les sources d'énergie les plus importantes de nos jours au Canada, entre autres le charbon, le pétrole, le gaz, la puissance hydraulique et la fission. L'hydrogène aura un rôle important à jouer dans la mise en valeur de chacune d'entre elles.

À plus long terme, de nouvelles sources se manifesteront peut-être et feront une contribution notable à l'échelon régional ou mondial. Ainsi, la fusion nucléaire pourrait prendre une importance mondiale. Bien qu'elle puisse exiger encore cinquante ans de recherches, elle sera sans doute destinée à la production à grande échelle d'hydrogène. À l'échelon régional, les énergies géothermique, éolienne et marémotrice laissent entrevoir des promesses d'avenir. Si l'exploitation de l'une d'entre elles est couronnée de succès, elle gagnera beaucoup en utilité si elle sert à produire de l'hydrogène. On peut parier à tout coup sur l'hydrogène.

Ce qui nous amène, naturellement, à jeter un dernier regard sur la concurrence.

Un dernier regard sur la concurrence

Un regard sur la concurrence nous permettra de mieux comprendre ce qui se passe. Ajoutons également que le fait de connaître les domaines où la concurrence ne joue pas peut également être révélateur. L'hydrogène, en tant qu'énergie, *n'entre pas en concurrence* directe avec les sources d'énergie. Par exemple, l'on ne saurait opposer hydrogène et énergie solaire, puisqu'il s'agit de forces alliées, comme nous allons le voir.

De nos jours, l'énergie solaire peut servir au chauffage domiciliaire : on l'utilise pour chauffer les bâtiments en hiver et pour réchauffer les piscines en été. Bien qu'elle soit coûteuse, l'énergie solaire peut également produire de l'électricité, mais seulement par journées ensoleillées*. Comme toute forme d'électricité, celle qui est obtenue d'énergie solaire ne peut être emmagasinée, ce qui en restreint grandement l'utilisation. Mais, grâce à l'hydrogène, l'énergie solaire peut servir de combustible et faire une percée sur de nombreux nouveaux marchés. Par exemple, l'hydrogène rendra possible l'utilisation de l'énergie solaire pour faire voler les avions. On est encore bien loin de telles réalisations, mais cet exemple illustre comment l'énergie solaire et l'hydrogène peuvent coexister.

Il en est ainsi de l'hydrogène et des forces marémotrices et éoliennes, de la fusion nucléaire ou même de la biomasse. Il peut sembler étrange que l'hydrogène et la biomasse puissent être alliés. Toutefois, lorsqu'elle sert à produire des combustibles liquides, la biomasse manque d'hydrogène. Par exemple, la production d'éthanol par fermentation de la biomasse est peu efficace sur le plan énergétique et dégage du gaz carbonique. Si l'on ajoute de l'hydrogène, la production de combustibles liquides augmente considérablement.

L'hydrogène ne rivalise jamais avec les sources d'énergie. D'une façon ou d'une autre, il en relève l'efficacité d'utilisation ou leur ouvre de nouveaux marchés. L'hydrogène permet une meilleure utilisation des combustibles fossiles et de la biomasse dans la production de combustibles liquides. De plus, il permet aux sources d'énergie renouvelables "non matérielles" (comme la puissance hydraulique, le rayonnement solaire, le vent, la fission et la fusion nucléaires) d'alimenter les véhicules.

L'hydrogène est plutôt vu comme un produit qui favorisera l'union de deux sources d'énergie : sans hydrogène, le rayonnement solaire ne pourrait concurrencer l'essence, en aviation.

En définitive

Si le recours à l'hydrogène s'impose déjà, le besoin des technologies de l'hydrogène est encore plus impératif. Quel que soit l'avenir, nous aurons de plus en plus besoin de l'hydrogène et de ses technologies. L'hésitation pourrait bien être notre seul ennemi; l'action est évidemment notre alliée.

* Nous faisons allusion ici à l'utilisation *directe* de l'énergie solaire au moyen de technologies, tels les procédés photovoltaïques. Le rayonnement solaire, bien sûr, cause l'évaporation de l'eau qui s'accumule dans les nuages qui, eux, se gonflent et déversent leurs pluies sur les lacs et les rivières, tandis que l'énergie hydraulique, pour sa part, engendre de l'électricité. L'énergie solaire contribue également à la croissance des arbres. Ainsi, le charbon provenant du bois et le bois que nous brûlons représentent en fait de l'énergie solaire stockée. Mais, de toute évidence, personne n'associe énergie solaire et charbon; aussi, nous ne nous attarderons pas à cette question.

ANNEXE 1: DÉTAILS DES PROGRAMMES-TYPES

L'énoncé des tâches qui caractérise la nature des travaux du Comité consultatif porte davantage sur une conception globale que sur la minutie dans les détails : ce que l'on recherche avant tout, c'est une vue d'ensemble. Par conséquent, il ne convient pas de mettre au point un projet exhaustif et intégré de mise en œuvre. Beaucoup d'idées, de concepts excellents ont été exprimés au cours de nos discussions. Pour ne pas perdre ces idées, nous avons regroupé dans cette annexe une liste de projets possibles, quelques définitions et des descriptions. L'Agence canadienne de l'hydrogène, dont nous préconisons la création, pourrait les retenir comme point de départ à ses travaux.

Les activités sont classées selon deux groupes principaux : l'**Intégration des ressources** (groupe R), et les **Produits consommateurs d'hydrogène** (groupe P). Comme l'indique le tableau A.1, il existe, dans chaque groupe, des sous-catégories. Le tableau A.2 a pour but de montrer qu'une centralisation pourrait être plus efficace qu'une simple juxtaposition de projets, à cause de l'effet de convergence des différentes technologies de l'hydrogène. Le tableau A.3 donne une compilation du statut et des renseignements sur les coûts-bénéfices de chaque projet-type. Le tableau A.4 propose une échéance et des objectifs pour chacun des projets.

INTÉGRATION DES RESSOURCES (GROUPE R)

Technologies à mettre au point (Catégorie R-E)

Les activités classées dans cette catégorie sont des technologies et des produits qui, arrivés au terme de leur développement, pourront accroître la flexibilité et les occasions d'intégration des ressources. Ces technologies fournissent soit le lien entre deux technologies existantes soit un élargissement des marchés ouverts aux technologies en usage. De plus, la plupart de ces technologies, R-E-1, 2, 3, 4, 5 et 7, viennent appuyer le groupe des produits consommateurs d'hydrogène.

R-E-1 Catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau et purification de l'hydrogène

Le catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau (on dit aussi : reformage catalytique du méthane) CMV devrait dominer la production de l'hydrogène pour au moins trois décennies, et être important pendant plus de cinquante ans. Puisque la CMV constituera un procédé fondamental des systèmes d'intégration des ressources, il semble approprié que le gouvernement encourage l'amélioration de ce procédé, même s'il est bien établi. On pourrait, par exemple, envisager d'améliorer l'efficacité énergétique de la catalyse du méthane en parvenant à réduire l'excès de vapeur utilisée. L'amélioration des matériaux métallurgiques destinés aux échangeurs de chaleur et à d'autres applications pourrait aussi représenter un progrès technique significatif. Des catalyseurs qui résistent mieux à l'action d'impuretés comme le soufre seraient rapidement adoptés par l'industrie.

Plusieurs procédés alimentés à l'hydrogène exigeront un hydrogène de grande pureté. Par exemple, seul l'hydrogène très pur peut être liquéfié, et il est probable que le H_2L va dominer le marché du transport de l'hydrogène. De plus, certaines des piles à combustible les plus efficaces consomment de l'hydrogène très pur. L'aide de l'État en R-D sur les technologies de purification de l'hydrogène enlèverait certaines barrières qui s'opposent à la pénétration du H_2 CMV dans le secteur des transports. On devrait étudier la diffusion gazeuse sur membrane, possiblement en collaboration avec le Conseil de recherche de l'Alberta et avec les autres organismes intéressés.

R-E-2 Production de l'hydrogène par d'autres sources que les sources fossiles

L'importance de la poursuite des efforts visant à améliorer le rendement et la flexibilité et à diminuer les coûts d'investissement et d'exploitation des technologies de production de l'hydrogène par électrolyse est clairement apparent. L'électrolyse étant, par nature, modulaire, les incertitudes liées au changement d'échelle de production se trouvent réduites. Toutefois, la possibilité de passer à des centaines ou à des milliers de MW devra être démontrée si l'on veut que l'électrolyse trouve des applications importantes dans l'intégration des ressources.

En plus de l'oxygène, les sous-produits de l'électrolyse pourront comprendre le D_2O (oxyde de deutérium, mieux connu sous le nom d'eau lourde). Les procédés d'extraction du D_2O et d'utilisation du O_2 devront être inclus dans le programme de mise au point de l'électrolyse. La technologie canadienne de production d'eau lourde a donné d'excellents premiers résultats.

Avec le temps, des procédés thermochimiques et électrochimiques hybrides pourront servir à la production de H_2 DNF. Les Européens se sont penchés sur ces technologies il y a plus de dix ans mais, en comparaison avec l'électrolyse, elles requièrent une mise au point bien plus importante. Les cycles thermochimiques et électrothermo-chimiques pourraient devenir d'importantes méthodes de production vers la fin du siècle. Il faut que ces réalisations fassent l'objet d'un suivi. Il convient aussi d'étudier le procédé allemand de fabrication de l'hydrogène par dissociation directe et recombinaison du méthane et de l'eau, dans des réacteurs à haute température et refroidis par gaz. On prévoit que des pays comme l'Allemagne pourraient être intéressés à collaborer à ces programmes de développement, mais seulement si le Canada s'intéresse activement ces techniques de l'hydrogène. Le Canada devrait aussi envisager d'appuyer des approches expérimentales nouvelles à petite échelle, visant à la production de H_2 DNF.

R-E-3 Compression et liquéfaction

La liquéfaction et la compression sont des techniques bien établies. Mais, comme la CMV, on doit les améliorer dans le cadre de nos recherches. Les techniques conventionnelles n'atteignent qu'une efficacité relativement faible en regard des limites que la thermodynamique leur assigne. Des recherches ont été entreprises sur des technologies qui pourraient dépasser les limites actuelles. Citons, comme exemple, la réfrigération et la liquéfaction par effet magnétocalorique. Ces activités devraient être analysées, et l'on devrait mettre sur pied, au moment opportun, un programme canadien.

R-E-4 Distribution et stockage

Des chercheurs de plusieurs pays ont effectué beaucoup de travaux de recherches et d'estimation sur la distribution et le stockage de l'hydrogène. Ces travaux ont été effectués à la fois sur des systèmes de distribution installés depuis de nombreuses années (p. ex., les canalisations pour l'hydrogène de l'Allemagne de l'Ouest) et sur des réseaux expérimentaux (p. ex., au *Gas Research Institute*, à Chicago). La meilleure façon pour le Canada d'exploiter ses capacités dans ce domaine est peut-être de rechercher la collaboration avec les établissements étrangers.

Le projet P-E-6 de recherche sur les matériaux pourrait apporter des contributions importantes aux questions de distribution et de stockage.

R-E-5 CANDU et l'optique hydroélectrique

On devrait inviter l'industrie nucléaire à proposer un programme d'étude sur les meilleures applications que l'on puisse faire de la technologie du CANDU dans le marché des productions chimiques. Certains travaux sur des caloporteurs organiques qui pourraient permettre de porter la vapeur à des températures et à des pressions telles qu'ils pourraient être construits près des dépôts

de sables bitumineux pour en assurer l'exploitation et sur une technologie d'obtention d'eau lourde comme sous-produit des procédés d'électrolyse, ont déjà débuté. Ces travaux pourraient fournir le point de départ de l'évaluation du CANDU comme technologie possible dans les procédés à l'hydrogène.

Une possibilité unique des centrales hydrauliques et nucléaires est dans la production d'électricité en CC, sans passer par l'intermédiaire du CA. Cela pourrait améliorer de jusqu'à 5 % le rendement de la production en électricité, et réduire les coûts d'immobilisations dans la production d'hydrogène. D'autre part, par une modeste mise de fonds, ces mêmes unités pourraient interrompre leur production de CC destiné à la production d'hydrogène, et se raccorder au réseau CA, pendant les périodes de demande de pointe.

R-E-6 Traitement des hydrocarbures lourds, par H₂, O₂ et chaleur

Le Comité consultatif recommande que l'ACH travaille conjointement avec le BRTSBA afin de définir des activités appropriées. L'évaluation des possibilités d'intégrer les sources fossiles et non fossiles à la production de combustibles et de substances chimiques serait un domaine important de concertation. Ce réseau de coopération devrait aussi inclure d'autres organismes chargés de mettre au point les technologies du charbon et des pétroles lourds.

L'ACH devrait s'intéresser de près à la recherche outre-frontières, particulièrement aux projets ouest-allemands en vue d'utiliser les produits (H₂ et CO) obtenus de procédés qui intègrent le gaz naturel et les réacteurs nucléaires à haute température.

R-E-7 Technologies appropriées aux sources d'énergies locales et régionales

Ces activités devraient inclure l'utilisation de la puissance marémotrice de la côte Est à la production de l'hydrogène, et des ressources hydrauliques de basse chute des autres régions en y associant les petites communautés et les usagers individuels. Ces technologies installées pour de petits usagers doivent être conçues en fonction de leurs faibles coûts d'immobilisations. De plus, d'autres sources, comme le vent ou la biomasse, pourraient jouer un rôle. Ces projets à petite échelle pourraient aussi s'adapter aux besoins du Tiers-Monde.

R-E-8 Technologies de l'hydrogène destiné à l'industrie métallurgique

L'utilisation de l'hydrogène pour la réduction des minerais est très prometteuse. L'ACH devra identifier, avec l'aide de l'industrie de la métallurgie, les possibilités.

INTÉGRATION DES RESSOURCES

Évaluations à l'échelle pilote (Catégorie R-P)

Il est indispensable que des évaluations soient effectuées à l'échelle pilote et que celles-ci aillent au-delà de la démonstration d'une technologie isolée. En plus d'évaluer les composantes technologiques relativement à certains critères de rendement, il faut vérifier la compatibilité technique de chaque composante avec l'ensemble du système, et s'assurer de ses effets sur le secteur des affaires (compatibilité institutionnelle).

R-P-1 Sur le terrain : les sables bitumineux

L'AOSTRA a proposé que soit construite une usine pilote de 60 MW pour l'électrolyse sur les lieux d'exploitation des sables bitumineux. Cet électrolyseur produirait environ 10 % de

l'hydrogène consommé par l'usine d'affinage. Comme l'électrolyseur serait expérimental, sa capacité de H_2 CMV serait de 100 %, de sorte qu'aucune interruption de production occasionnée par les technologies nouvelles ne serait permise. Cette usine pilote pourrait être modifiée afin de permettre à l'oxygène électrolytique de servir, avec le procédé d'oxydation partielle (OXF), à produire plus d'hydrogène.

R-P-2 Sur le terrain : une raffinerie

On pourrait retirer des avantages à implanter un projet pilote d'affinage de 5 000 barils par jour sur le site d'un complexe de raffinage existant. La présence sur les lieux de compétences, d'équipement et d'un environnement technique appropriés faciliterait l'obtention des autorisations et accélérerait le projet. On pourrait y évaluer l'effet stimulant d'intégration des systèmes près des raffineries. Le procédé CANMET de craquage catalytique par Pétro-Canada à Montréal en est un exemple.

R-P-3 Sur le terrain: CANDU

Ce projet permettrait de connaître les difficultés et les avantages qu'il y a à produire, à partir des hydrocarbures lourds, des combustibles liquides en grandes quantités lorsque le complexe se trouve voisin d'une centrale nucléaire. Les sites possibles comprennent la station d'énergie nucléaire de Bruce et le nouvel établissement de Darlington. Plusieurs études théoriques ont déjà servi à calculer les avantages et les coûts de projets dont l'ampleur va de 5 000 barils par jour (pour une usine pilote) jusqu'à 44 000 barils par jour pour l'affinage à l'échelle industrielle. Les sous-produits pourraient inclure de la vapeur utilisable de qualité moyenne, de l'eau déminéralisée, et du CO_2 qui pourra servir dans des serres.

PRODUITS CONSOMMATEURS D' H_2 (GROUPE P)

Technologies à mettre au point (Catégorie P-E)

Les technologies désirées permettent, soit de faire le lien entre deux technologies existantes soit d'accroître les marchés des technologies existantes. Pour ce qui est des produits consommateurs d'hydrogène, ces technologies sont la composante primordiale du succès de plusieurs produits finis. Par exemple, des véhicules urbains de service pourront nécessiter des technologies comme celles du stockage de l'hydrogène, des piles à combustible, des accumulateurs basse-décharge, des régulateurs de puissance et des moteurs électriques, en n'oubliant pas les freins et la suspension convenable.

P-E-1 Piles à combustible

Les piles à combustible relèvent d'une technologie fondamentale qui connaîtra son plein épanouissement au cours de l'ère de l'hydrogène (se référer à la section 2.2). Sans piles à combustible, plusieurs technologies d'utilisation, particulièrement dans le secteur des transports, ne pourraient pas voir le jour. Plusieurs types de piles à combustible en sont à l'étape de la mise au point, mais la plupart s'adressent aux combustibles fossiles.

Dans le programme américain de piles à combustible pour applications terrestres, on a dû faire un choix il y a plus d'une décennie : mettre au point une nouvelle pile à combustible à haute température (à l'acide phosphorique) qui pourrait consommer de l'hydrogène non purifié, ou mettre au point des systèmes de purification de l'hydrogène qui permettent d'utiliser les meilleures piles à combustible de notre temps (piles alcalines). Les Américains ont retenu la pile à l'acide phosphorique, erreur qui, d'après certains, est évaluée à 250 millions de dollars.

Les piles à combustible alcalines qui ont été utilisées avec succès dans le programme spatial américain sont beaucoup trop coûteuses pour permettre une utilisation commerciale. En Allemagne, la firme Siemens a mis au point une pile moins coûteuse à l'hydrogène/oxygène, mais celle-ci doit être munie d'oxygène et d'un sous-système de manipulation, ce qui ajoute à la complexité, au poids et à l'investissement initial. Le consortium hollando-belge Elenco a réalisé une pile à combustible alcaline aérobie, mais la conception en est handicapée par le choix d'une configuration monopolaire des électrodes.

S'appuyant sur ces recherches sur les piles à combustible, le Comité consultatif est d'avis qu'une pile à combustible alcaline pourrait présenter une belle occasion pour le Canada de faire son entrée dans ce marché. Ce sont les piles alcalines qui promettent les meilleurs rendements, les plus bas coûts en matériaux et l'ingénierie la moins complexe. Ce type de pile (sans doute en configuration bipolaire) pourrait assimiler les plus récents progrès en plastiques conducteurs et se passer de l'électrocatalyse par métaux onéreux. De plus, le Canada pourrait allier à l'électrochimie des piles alcalines l'expérience américaine en production de grandes piles à combustible phosphoriques, ce qui accélérerait le développement des grands systèmes. Enfin, puisque les électrolytes alcalins sont utilisés au Canada en électrolyse, la R.-D. en pile à combustible alcaline pourrait stimuler le programme canadien d'électrolyse. Les piles alcalines à combustible, parce qu'elles consomment de l'hydrogène très pur, bénéficieraient aux technologies de purification de l'hydrogène, puisque les piles ne pourront réaliser toutes leurs promesses que si on les alimente d'hydrogène de très haut niveau de pureté.

Un deuxième type de piles à combustible, basé sur les technologies d'échange d'ions sur membrane (EIM), devrait être aussi considéré. La plupart des cellules EIM ont été mises au point pour l'usage des électrolytes à membrane acidifiée. Les piles à membrane offrent la disposition la plus intéressante pour les piles à combustible, mais requièrent toujours une alimentation de monoxyde de carbone et d'hydrogène exempt de soufre. Les piles à membrane fonctionnent couramment avec des charges importantes de métaux catalyseurs onéreux, ce qui accroît les coûts d'investissement. Une R-D poussée pourrait réduire grandement ces limitations.

P-E-2 Moteurs thermiques

Le Comité consultatif ne recommande pas que les moteurs à combustion interne à pistons soient adaptés à l'alimentation à l'hydrogène. Puisque les technologies réadaptées au fonctionnement avec de nouveaux carburants fonctionnent rarement aussi bien qu'avec les carburants pour lesquelles elles ont été conçues, il arrive rarement que ces reconversions techniques parviennent au succès commercial.

D'autre part, les turbines au gaz à l'hydrogène pour l'aviation permettront sans doute des accroissements du rendement. Les fonds nécessaires étant trop importants pour que le Canada se charge seul de la mise au point de ces moteurs, seule une société multinationale (comme Pratt et Whitney), dans le cadre d'une entente bilatérale canado-américaine, pourrait s'acquitter des recherches sur un avion propulsé par l'hydrogène.

Il peut exister aussi beaucoup de possibilités de mise au point de turbines alimentées à l'hydrogène et à l'oxygène, en présence peut-être d'un gaz rare comme diluant. Ces turbines pourraient être couplées à une usine électrolytique et contribuer au nivellement de la demande.

P-E-3 Stockage d'emport et réapprovisionnement en hydrogène liquide

La plus grande contre-indication à l'utilisation de l'hydrogène dans les transports est peut-être la question du stockage d'emport. L'hydrogène liquide pourra sûrement convenir à des nombreuses applications. Par le truchement d'ententes internationales, des circonstances favorables pourront permettre que soient mis au point des réservoirs cryogéniques en matériaux composites pour le stockage de l'hydrogène liquide. Ces réservoirs, même s'ils sont destinés à l'hydrogène liquide

pourront avoir d'autres applications commerciales. Les technologies de réapprovisionnement pourront aussi être développées en collaboration avec des intérêts allemands et américains.

P-E-4 Stockage d'emport et réapprovisionnement en hydrogène non liquide

Les exigences techniques de stockage d'emport seront peut-être la plus grave contre-indication de l'usage de l'hydrogène dans les transports. C'est pour cette raison que le Comité recommande que l'on évalue d'autres moyens de stocker l'hydrogène, y compris, sous forme d'hydrures métalliques, afin de s'assurer qu'aucune possibilité n'a été négligée. Certaines de ces possibilités de stockage peuvent s'avérer utiles dans des circonstances où un accroissement de poids n'a pas d'importance, ou lorsque de petites quantités d'hydrogène doivent être enteposées durant de plus longues périodes.

P-E-5 Accumulateurs pour trains à traction hybride

La plus grande partie de la mise au point des accumulateurs a été consacrée à corriger ce qui semble le plus grand défaut de ces dispositifs, soit leur faible densité d'énergie (kilowatt-heure/kilogramme). Si les accumulateurs sont l'unique source d'énergie d'un véhicule, cette faible densité d'énergie a des effets fâcheux sur l'autonomie du véhicule entre chaque recharge. Le temps important qu'il faut consacrer à la recharge des accumulateurs constitue aussi un problème dans le cas de bon nombre de véhicules.

D'autre part, un véhicule électrique peut fonctionner en transportant, sous forme d'hydrogène, son énergie de réserve, et en se servant de piles à combustible pour tirer l'électricité de l'hydrogène. Le rapport kilowatt-heure/kilogramme n'est alors limité que par l'augmentation de poids de la réserve additionnelle, et l'autonomie n'est limitée que par la contenance du réservoir d'hydrogène.

Toutefois, c'est la densité de *puissance* qui limite les piles à combustible (kilowatts/kilogramme), et non la densité d'énergie. Un véhicule propulsé uniquement par piles à combustible peut jouir d'une autonomie et d'un rayon d'action acceptables, mais pourra souffrir d'un manque de puissance. Les limitations des piles à combustible sont exactement complémentaires des limitations des accumulateurs. Donc, en créant un hybride, c'est-à-dire en combinant un réservoir à hydrogène et des piles à combustible qui assurent une densité suffisante d'énergie, avec des accumulateurs dont la densité de puissance est mise à profit durant les accélérations, on peut éluder les inconvénients de chaque technologie.

Peu de fabricants d'accumulateurs sont conscients de ces possibilités; il y a donc eu peu de recherches approfondies sur les accumulateurs de basse décharge, de grande puissance et de petite capacité. Plusieurs configurations électrochimiques sont possibles, et l'industrie canadienne des accumulateurs pourrait en tirer parti.

P-E-6 Mise au point des matériaux

On entend souvent dire qu'il n'y a pas de problèmes technologiques, qu'il n'y a que des problèmes de matériaux. Il n'est pas douteux que la mise au point de matériaux améliorés va jouer un rôle important dans le temps requis pour introduire les nouvelles technologies de l'hydrogène.

La fragilité des matériaux avec l'hydrogène a déjà beaucoup retenu l'attention au Canada, puisque ces phénomènes ont déjà causé la défaillance des tubes du réacteur CANDU. L'EACL et Hydro-Ontario ont entrepris une étude poussée pour comprendre les interactions métaux-hydrogène sous des conditions physiques extrêmes. Ces groupes, ainsi que d'autres, peuvent former le noyau d'un programme important sur les matériaux de l'hydrogène.

P-E-7 Sécurité et manipulations : normes et codes

On doit mettre au point des codes de sécurité en prévisions des exploitations industrielles et commerciales qui commencent à se manifester. Le CNRC a déjà entamé ce processus; des groupes allemands et américains pourraient s'avérer de précieux collaborateurs pour leur rédaction.

PRODUITS CONSOMMATEURS D'HYDROGÈNE

Applications à la défense et à l'exercice de la souveraineté (Catégorie P-D)

Les produits destinés à l'indépendance du Canada et à sa défense sont différents de ceux que nous proposons dans le cadre de notre rapport. Toutefois, beaucoup de produits conçus pour la défense peuvent être appliqués au civil. On peut donner comme exemple les hélicoptères à l'hydrogène, dont la mise au point pourrait contribuer à la croissance et à l'exploration plus approfondie du Nord canadien.

P-D-1 Surveillance et communications dans des lieux éloignés

Des piles à combustible, fonctionnant à l'hydrogène liquide livré par avion et destinées au système d'alerte du Nord, devraient être étudiées afin d'en déterminer leur potentiel comme sources d'énergie. Il existe peut-être des débouchés identiques dans les systèmes de navigation et dans l'équipement de surveillance à distance et de communications. Du fait que les piles peuvent recevoir des applications commerciales, des programmes devraient être entrepris avec l'aide des sociétés de télécommunications.

P-D-2 Plate-forme spatiale

Si le Canada collabore à un programme multinational de construction d'une plate-forme spatiale, il devrait se réserver un rôle dans les technologies de distribution et de stockage de l'hydrogène et dans la mise au point des piles à combustible. Une stratégie consisterait à adopter les programmes terrestres de développement à la recherche spatiale, puisque cette approche pourrait notablement réduire les coûts au fur et à mesure que les activités spatiales trouveront des applications commerciales.

P-D-3 Sous-marins

Il y a place, entre les sous-marins propulsés par accumulateurs électriques et les sous-marins nucléaires, pour des sous-marins fonctionnant sur piles à combustible. En plus de leurs applications à la défense, des sous-marins à piles à combustible pourraient se tailler un part importante du marché de la recherche scientifique, et contribuer à l'exploration et à la mise en valeur des fonds marins qui appartiennent à la vaste plate-forme continentale canadienne.

P-D-4 Hélicoptères de surveillance et de reconnaissance

À cause d'une plus grande autonomie et du temps passé dans l'air ou dans une station spéciale, des hélicoptères alimentés à l'hydrogène pourraient s'avérer utiles de plusieurs façons, et en particulier pourraient jouer un rôle important dans l'exploitation du Nord canadien. Il est certain que des hélicoptères alimentés à l'hydrogène et mis au point pour la défense nationale pourraient trouver de multiples applications commerciales, au fur et à mesure que se développeront les méthodes d'approvisionnement en hydrogène.

P-D-5 Avions de patrouille et de reconnaissance

Un avion à ailes fixes alimenté à l'hydrogène présenterait des avantages semblables à ceux des hélicoptères de même conception. Le fait d'utiliser de l'hydrogène pourrait améliorer l'autonomie et la capacité d'emport, ce qui réduirait le besoin de réapprovisionnement, et permettrait de mener des missions de reconnaissance moins nombreuses, mais plus longues. Il faudrait aussi étudier d'autres applications des technologies de l'hydrogène à l'aviation.

PRODUITS CONSOMMATEURS D'HYDROGÈNE

Véhicules commerciaux (Catégorie P-V)

Le programme national de l'hydrogène *doit* servir à mettre au point des véhicules fonctionnant à l'hydrogène.

P-V-1 Véhicules destinés à des sites critiques

L'utilisation de l'hydrogène sur des sites spécifiques peut être profitable et rentable pour deux raisons : à cause des avantages pour l'environnement, et à cause du coût de l'utilisation des combustibles conventionnels.

Une étude, avec la collaboration d'un fabricant d'équipement minier, a montré les avantages de la mise au point de véhicules miniers mus par l'hydrogène. Il s'agirait d'une des meilleures applications à court terme. Toutefois, le marché est petit et il est possible que l'on puisse utiliser des moteurs à combustion interne reconditionnés. Dans une mine, le coût plus élevé de l'hydrogène peut être compensé par les économies faites dans l'équipement de conservation de la qualité de l'air. Des applications, caractérisées par des exigences et des bénéfices semblables, peuvent exister dans le matériel de forage, les véhicules d'excavation et de construction et dans les grands ponts-roulants des entrepôts.

Il existe, dans des lieux éloignés, un marché pour les véhicules propulsés par l'hydrogène. Par exemple, pendant sa phase de construction, le projet hydroélectrique de la baie James a utilisé beaucoup de véhicules diesel approvisionnés en carburant par la voie des airs. Dans de telles circonstances, il pourrait être plus rentable de fabriquer sur place l'hydrogène par électrolyse plutôt que de faire venir par avion des carburants conventionnels. Ce sont des études qu'il faut faire.

P-V-2 Véhicules urbains spéciaux de service

Prenons par exemple les camions mixtes qu'utilisent les sociétés de télécommunications comme Bell Canada. Ces véhicules remplissent deux fonctions : ils servent à transporter les travailleurs et ils produisent le courant électrique nécessaire à l'entretien et aux réparations dans des lieux non desservis par le réseau et d'où l'accès se fait par des trous d'homme. À l'heure actuelle, ces véhicules utilisent un moteur conventionnel pour leur propulsion et une génératrice pour le courant électrique. On pourrait mettre au point un véhicule hybride à accumulateurs et à piles à combustible qui s'acquitterait efficacement de ces deux fonctions. Les accumulateurs fourniraient les besoins de propulsion et les piles à combustible donneraient ceux d'électricité. Au repos, les piles à combustible pourraient servir à recharger les accumulateurs.

P-V-3 Locomotives

En considérant les priorités nationales en énergie, on peut avoir deux idées sur les locomotives alimentées à l'hydrogène. D'abord, on peut considérer que la façon la plus économique est que le gaz naturel prenne le marché ferroviaire; cependant le coût de génération de l'hydrogène à partir du

gaz naturel peut être plus que compensé par la bien plus grande efficacité de l'hydrogène si l'on utilise des piles à combustible et que ces piles sont bien plus efficaces que des moteurs diesel. Ensuite, on peut considérer qu'introduire des locomotives à l'hydrogène est une façon détournée d'électrifier les chemins de fer, si nous donnons à cette électrification le sens de l'utilisation de l'électricité à la traction des trains. Nous devons nous rappeler qu'il y a deux façons d'électrifier les chemins de fer : par électrification directe à l'aide d'un troisième rail ou d'une caténaire, ou par électrification indirecte à partir d'hydrogène électrolytique et de préférence avec piles à combustible. Le Comité consultatif recommande que l'ACH examine à fond la possibilité d'électrification indirecte, et qu'elle recommande la construction d'un prototype de locomotive à piles à combustible. Les locomotives à piles à combustible présentent une série d'avantages marqués par rapport à l'électrification directe.

- Notre puissance électrique, par le truchement de l'hydrogène, pourra assurer la traction des trains.
- En ce sens, grâce à l'électrification indirecte, les locomotives à piles à combustible nous évitent d'avoir à faire les importantes dépenses en immobilisations que nécessiterait l'électrification directe des voies ferrées, soit par adjonction d'un troisième rail soit par construction d'un système suspendu à caténaire.
- Les locomotives à piles à combustible nous éviteront l'apparence inesthétique des suspensions électrophores.
- Les locomotives à piles à combustible préviendront les bris de caténaires accablées sous le poids des glaces ou des troisième rails par l'entassement de la neige.
- Les locomotives à piles à combustible desserviront des régoins éloignées et assureront les transports jusque dans les régions où l'électrification directe serait excessivement chère. Chaque kilomètre de voie sera ainsi, indirectement, "électrifié".
- Les locomotives à piles à combustible n'ajouteront pas aux fardeaux que supportent les réseaux électriques des grandes villes dans les heures de pointe.
- *Le recours aux piles à combustible à l'hydrogène fait en sorte que la technologie dispose d'un plus grand nombre de choix relativement à l'utilisation de l'hydrogène dérivé du gaz naturel, lorsque il y a lieu. De plus, ceci peut représenter la façon la plus économique pour le FOH₂ du gaz naturel de percer le marché ferroviaire.*

Plusieurs études ont déjà été faites sur les possibilités des locomotives à piles à combustible; ces études peuvent servir de point de départ aux développements futurs.

P-V-4 Vaisseaux des Grands Lacs et navires-citernes sous-marins

Des piles à combustible pourraient fournir aux navires des mégawatts d'énergie rentables, une grande sûreté d'approvisionnement et leur donner une vaste autonomie. Il est toutefois peu probable que des piles aussi grandes ne soient construites que pour les seules applications navales.

Le transport des hydrocarbures depuis les régions polaires en passant sous les glaces, grâce à des citernes sous-marines, représente de grandes possibilités et doit être ajouté à la liste des projets à étudier.

AUTRES CATÉGORIES

P-O-1 Applications indépendantes de l'énergie

Ces applications ont été décrites à la fin de la section 3.2, sous la rubrique 5.

TABLEAU A1 LES DEUX CATÉGORIES DES ACTIVITÉS DU PROGRAMME

INTÉGRATION DES RESSOURCES (GROUPE R)

Technologies à mettre au point (Catégorie R-E)

R-E-1 Catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau et purification de l'hydrogène

R-E-2 Production d'hydrogène par d'autres sources que les sources fossiles

R-E-3 Compression et liquéfaction

R-E-4 Distribution et stockage

R-E-5 CANDU et l'optique hydro-électrique

R-E-6 Traitement des hydrocarbures lourds, par H_2 , O_2 et chaleur

R-E-7 Technologies appropriées aux sources d'énergies locales et régionales

R-E-8 Technologies de l'hydrogène destiné à l'industrie métallurgique

Évaluation à l'échelle pilote (Catégorie R-P)

R-P-1 Sur le terrain : les sables bitumineux

R-P-2 Sur le terrain : une raffinerie

R-P-3 Sur le terrain : CANDU

PRODUITS CONSOMMATEURS D'HYDROGÈNE (GROUPE P)

Technologies à mettre au point (Catégorie P-E)

P-E-1 Piles à combustible

P-E-2 Moteurs thermiques

P-E-3 Stockage d'emport et réapprovisionnement en hydrogène liquide

P-E-4 Stockage d'emport et réapprovisionnement en hydrogène non liquide

P-E-5 Accumulateurs pour trains à traction hybride

P-E-6 Mise au point des matériaux

P-E-7 Sécurité et manipulations : normes et codes

Applications à la défense et à l'exercice de la souveraineté (Catégorie P-D)

P-D-1 Surveillance et communications dans des lieux éloignés

P-D-2 Plate-forme spatiale

P-D-3 Sous-marins

P-D-4 Hélicoptères de surveillance et de reconnaissance

P-D-5 Avions de patrouille et de reconnaissance

Véhicules commerciaux (Catégorie P-V)

P-V-1 Véhicules à des sites critiques (p. ex. les mines)

P-V-2 Véhicules urbains spéciaux de service

P-V-3 Locomotives

P-V-4 Vaisseaux des Grands Lacs et navires-citernes sous-marins

Autres catégories (Catégorie P-O)

P-O-1 Applications indépendantes de l'énergie

TABLEAU A2 CONJONCTIONS TYPIQUES DE PROGRAMMES

LÉGENDE

● Essentiel

○ Utile

ON A BESOIN DE CES
TECHNOLOGIES ET/OU
PRODUITS

AFIN DE DÉVELOPPER CES
TECHNOLOGIES ET/OU
PRODUITS

	RE-1	RE-2	RE-3	RE-4	RE-5	RE-6	RE-7	RE-8	RP-1	RP-2	RP-3	P-E-1	P-E-2	P-E-3	P-E-4	P-E-5	P-E-6	P-E-7	P-D-1	P-D-2	P-D-3	P-D-4	P-D-5	P-V-1	P-V-2	P-V-3	P-V-4	P-O-1
Catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau et purification de l'hydrogène	●																											
Production d'hydrogène par d'autres sources que les sources fossiles		●																●										
Compression et liquéfaction		○	○							○	○	○						○										
Distribution et stockage		○	○	○														○										
CANDU et l'optique hydro-électrique		●	○	○	○					○	○						●	●										
Traitement des hydrocarbures lourds, par H ₂ , O ₂ et chaleur		○	●	○	○	○	○			○							○	○										
Technologies appropriées aux sources d'énergies locales et régionales		●	○	○			○										○	○										●
Technologies de l'hydrogène destinée à l'industrie métallurgique		●		●			○										○	○										
Sur le terrain : les sables bitumineux		○	○	○	○			○	○	○	○						○	○										
Sur le terrain : une raffinerie		○	○	○	○			○	○	○	○						○	○										
Sur le terrain : CANDU		○	●	○	○	○		○	○	○	○																	
Piles à combustible		○	○									○	○	○	○	○	○	○										
Moteurs thermiques												○	○	○	○	○	○	○										
Stockage d'import et reapprovisionnement en hydrogène liquide			○	○								○	○	○	○	○	○	○										
Stockage d'import et reapprovisionnement en hydrogène non liquide			○	○								○	○	○	○	○	○	○										
Accumulateurs pour trains à traction hybride												○	○	○	○	○	○	○										
Mise au point des matériaux												○	○	○	○	○	○	○										
Sécurité et manipulations : normes et codes												○	○	○	○	○	○	○										
Surveillance et communications dans des lieux éloignés		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Plate-forme spatiale												○	○	○	○	○	○	○		○								
Sous-marins												○	○	○	○	○	○	○		○								
Hélicoptères de surveillance et de reconnaissance		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Avions de patrouille et de reconnaissance		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Véhicules à des sites critiques (p. ex. les mines)		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Véhicules urbains spéciaux de service		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Locomotives		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Vaisseaux des Grands Lacs et navires-citernes sous-marins		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								
Applications indépendantes de l'énergie		○	○	○	○							○	○	○	○	○	○	○		○								

TABLEAU A3 CRITÈRES DES SÉLECTIONS ET BESOINS DE DOTATIONS TYPIQUES

ACTIVITÉS DE PROGRAMME	ÉTAT DE LA TECHNOLOGIE 1-3 4-7 8-10 embryonnaire naissante ébauchée	BÉNÉFICES ÉCONOMIQUES VERSÉS AUX (E) (N) (D) industries existantes industries nouvelles dispersées	L'INDUSTRIE SE DÉVELOPPERAIT-ELLE DE TOUTE FAÇON ? (O) (S) (N) oui avec subventions de l'État non	POSITION CONCURRENTIELLE DU CANADA 10 5 0 excellente moyenne très mauvaise	COÛT TOTAL (en millions de \$ canadiens sur 5 ans) Projet pris isolément	PART DE L'ÉTAT	CONJONCTIONS DE CATÉGORIE	CONJONCTIONS DE GROUPE	PRIORITÉ 1 2 3 essentielle très importante importante
INTÉGRATION DES RESSOURCES (Groupe R)							140	120	
Technologies à mettre au point (Catégorie R-E)					66.5	51.2	40		1
R.E.1 Catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau et purification de l'hydrogène	8	E	O	5	10	6			2
R.E.2 Production d'hydrogène par d'autres sources que les sources fossiles	2	E	S	7	15	12			1
R.E.3 Compression et liquéfaction	6	E(N)	N	4	7	5.6			2
R.E.4 Distribution et stockage	4	E(N)	N	4	7	5.6			2
R.E.5 CANDU et l'optique hydro-électrique	3	E	N	7	10	10			2
R.E.6 Traitement des hydrocarbures lourds par H ₂ , O ₂ et chaleur	4	E	S	7	10	6			1
R.E.7 Technologies appropriées aux sources d'énergies locales et régionales	1	E	N	5	2.5	2			3
R.E.8 Technologies de l'hydrogène destinée à l'industrie métallurgique	6	E	O	6	5	4			3
Évaluation à l'échelle pilote (Catégorie R-P)					200	132	100		1
R.P.1 Sur le terrain : les sables bitumineux	4	E(N)	N	8	50	33			2
R.P.2 Sur le terrain : une raffinerie	5	E	S	5	50	33			3
R.P.3 Sur le terrain : CANDU	4	E(N)	N	8	100	66			3
PRODUITS CONSOMMATEURS D'HYDROGÈNE (Groupe P)							82	70	
Technologies à mettre au point (Catégorie P-E)					37.5	30			1
P.E.1 Piles à combustible	2	N(E)	N	3	25	20			1
P.E.2 Moteurs thermiques	2	E	N	3	5	4			3
P.E.3 Stockage d'import et reapprovisionnement en hydrogène liquide	4	N	N	3	7.5	6			1
P.E.4 Stockage d'import et reapprovisionnement en hydrogène non liquide	3	N	N	3	2.5	2			1
P.E.5 Accumulateurs pour trains à traction hybride	6	E(N)	S	4	2.5	2			3
P.E.6 Mise au point des matériaux	—	D	—	—	2.5	2			1
P.E.7 Sécurité et manipulations : normes et codes	7	D	N	—	1.5	1.5			2
Applications à la défense et à l'exercice de la souveraineté (Catégorie P-D)							37.5	25	1
P.D.1 Surveillance et communications dans des lieux éloignés	1	N	N	6	10	10			3
P.D.2 Plate-forme spatiale	6	N(E)	N	4	2.5	2.5			3
P.D.3 Sous-marins	1	N	N	5	5	5			3
P.D.4 Hélicoptères de surveillance et de reconnaissance	2	E(N)	N	5	10	10			3
P.D.5 Avions de patrouille et de reconnaissance	2	E(N)	N	3(7)	10	10			3
Véhicules commerciaux (Catégorie P-V)							30.4	25	1
P.V.1 Véhicules des sites critiques (p. ex. les mines)	1	E(N)	N	5	10	8			2
P.V.2 Véhicules urbains spéciaux de service	1	N(E)	N(S)	6	10	8			2
P.V.3 Locomotives	1	N(E)	N(S)	7	15	12			2
P.V.4 Vaisseaux des Grands Lacs et navires-citernes sous-marins	1	N	N	6	3	2.4			3
Autres catégories (Catégorie P-O)									
P.O.1 Applications indépendantes de l'énergie	1	N	N	6	3	2.5		2	2

TABLEAU A4 EXEMPLE : OBJECTIFS ET CALENDRIER DES TRAVAUX

ACTIVITÉS DU PROGRAMME	ÉVOLUTION VERS LES NOUVELLES TECHNIQUES EMBRYONNAIRES
INTÉGRATION DES RESSOURCES (Groupe R)	
Technologies à mettre au point (Catégorie R-E)	
R-E-1 Catalyse du méthane en présence de vapeur d'eau et purification à l'hydrogène	
R-E-2 Production d'hydrogène par d'autres sources que les sources fossiles	Usine d'électrolyse (capacité installée 600 MW)
R-E-3 Compression et liquéfaction	
R-E-4 Distribution et stockage	
R-E-5 CANDU et l'optique hydro-électrique	
R-E-6 Traitement des hydrocarbures lourds, par H ₂ , O ₂ et chaleur	
R-E-7 Technologies appropriées aux sources d'énergies locales et régionales	
R-E-8 Technologies de l'hydrogène destiné à l'industrie métallurgique	
Évaluation à l'échelle pilote (Catégorie R-P)	Deux projets opérationnels (1 dans l'est, 1 dans l'ouest du Canada)
R-P-1 Sur le terrain : les sables bitumineux	
R-P-2 Sur le terrain : une raffinerie	
R-P-3 Sur le terrain : CANDU	
PRODUITS CONSOMMATEURS D'HYDROGÈNE (Groupe P)	
Technologies à mettre au point (Catégorie P-E)	
P-E-1 Piles à combustible	Deux usines opérationnelles de 2 MW (à partir du module de 300 kW)
P-E-2 Moteurs thermiques	
P-E-3 Stockage d'import et réapprovisionnement en hydrogène liquide	
P-E-4 Stockage d'import et réapprovisionnement en hydrogène non liquide	
P-E-5 Accumulateurs pour trains à traction hybride	
P-E-6 Mise au point des matériaux	
P-E-7 Sécurité et manipulations : normes et codes	
Applications à la défense et à l'exercice de la souveraineté (Catégorie P-D)	Deux ou trois prototypes opérationnels
P-D-1 Surveillance et communications dans des lieux éloignés	
P-D-2 Plate-forme spatiale	
P-D-3 Sous-marins	
P-D-4 Hélicoptères de surveillance et de reconnaissance	
P-D-5 Avions de patrouille et de reconnaissance	
Véhicules commerciaux (Catégorie P-V)	
P-V-1 Véhicules à des sites critiques (p. ex. les mines)	
P-V-2 Véhicules urbains spéciaux de service	6 prototypes "Mark II"
P-V-3 Locomotives	3 prototypes de locomotives avec piles à combustible
Autres catégories (Catégorie P-O)	
P-O-1 Applications indépendantes de l'énergie	

ÉVOLUTION VERS LES TECHNIQUES ÉTABLIES		DATES
DATES	OBJECTIFS	DATES
1996	Amélioration de rendement de 10 % à l'étape de la capacité de 10 GW et exportation de la technologie canadienne	2002
	Capacité installée de 1 600 MW pour l'industrie chimique	2002
1994		
1994		
1997	Deux ou trois applications	2002
	Une ou deux applications	2002
1991	6 % du parc canadien de véhicules miniers alimentés en H ₂	1999
1996	Production annuelle de 18 locomotives (12 pour le marché intérieur, 6 pour l'exportation)	2006

ANNEXE 2 : SÉCURITÉ DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène est un très bon combustible et il est propre. Il brûle facilement et il contient beaucoup d'énergie relativement à son poids. De par leur nature, il faut manipuler les bons combustibles avec précautions, si l'on veut éviter les accidents.

On en connaît déjà long sur les méthodes sûres de manipulation de l'hydrogène. La NASA a produit des bons résultats dans des études importantes, et elle a publié des directives générales afin de s'assurer que l'hydrogène liquide, utilisé comme combustible des engins spatiaux, puisse être manipulé en grandes quantités sans risques. En fait, cette longue pratique a permis que des citernes cryogéniques remplies d'hydrogène liquide puissent emprunter communément les routes et les voies ferrées avec une sécurité remarquable. Des grandes quantités d'hydrogène gazeux sont communément manipulées dans les raffineries et les complexes pétrochimiques partout au monde. L'expérience allemande, vieille de cinquante ans, montre que l'hydrogène peut être acheminé en toute sécurité par gazoduc. L'hydrogène gazeux est communément expédié par route à destination d'entreprises de l'électronique ou du traitement des aliments.

Toutefois, toute nouvelle utilisation de l'hydrogène ou l'introduction de toute nouvelle technologie de l'hydrogène devra être faite en conformité avec les normes de sécurité établies. Et donc, l'agence nationale visant à la mise au point des technologies de l'hydrogène doit inclure, comme partie des études, une enquête permanente sur la sécurité. À mesure que les expériences s'accumuleront, il faudra mettre à jour les données sur la sécurité de l'hydrogène. Le Canada a déjà fait un pas dans cette direction grâce au Comité sur la sécurité de l'hydrogène, récemment formé au CNRC. Ces travaux, qui s'inscrivent dans le cadre de l'entreprise nationale de l'hydrogène, devront être poursuivis.

L'hydrogène ne ressemble pas aux hydrocarbures liquides dont on se sert communément comme combustibles. À cause de cela, la sécurité de son emploi exige plus de précautions dans certains cas, et peut-être moins, dans d'autres. Somme toute, si on le connaît bien et si on en use judicieusement, l'hydrogène est sans doute moins dangereux que tous les combustibles d'utilisation courante; l'expérience l'a démontré.

ANNEXE 3 : LE GAZ NATUREL D'ORIGINE MINÉRALE

Certains savants soutiennent aujourd'hui que l'origine primordiale des carburants fossiles n'est pas forcément *uniquement* biologique, c'est-à-dire, que les carburants fossiles ne dérivent pas *uniquement* de la matière vivante qui florissait du temps des dinosaures. Les tenants de cette opinion, regroupés autour du professeur Gold de l'Université Cornell, soutiennent que la molécule de méthane est apparue au début de l'univers, et que cette substance doit se trouver en grandes quantités dans les profondeurs de la terre. S'il en est ainsi, le méthane se serait échappé par dégazage au cours des millénaires, se serait polymérisé en partie pendant son infiltration vers les hautes couches de la planète, en même temps que se formaient les réserves d'hydrocarbures issues de la matière vivante, contribuant ainsi à la formation de dépôts solides et liquides.

Le premier puits au monde foré spécialement à la recherche du gaz naturel abiogénique (à travers des couches non sédimentaires) avait, au moment de la rédaction de ce rapport, dépassé la profondeur des 2 000 mètres. Ce puit a été foré depuis les bords du cratère de Silja, en Suède. Il se pourrait qu'au niveau des 5 000 mètres, sous une calotte rocheuse, se trouve un important réservoir de gaz naturel, lequel, vu la géologie des lieux, ne peut avoir qu'une origine minérale. Les opinions sur l'utilité de ce forage vont de l'optimisme prudent au scepticisme sans partage. Quel que soit le résultat, l'expérience présente un intérêt considérable pour ce qui est des techniques de forage à travers le granit, et pourra enrichir nos connaissances en géologie.

Si l'on trouve de grandes quantités de gaz naturel à des profondeurs de 5 000 mètres ou plus, cela pourrait s'avérer important pour des régions où le gaz naturel est peu disponible. Avec les techniques actuelles de forage, le gaz profond serait d'une exploitation très onéreuse, quoique la découverte de gaz profond pourrait stimuler fortement le perfectionnement des méthodes de percement des puits. Même si le gaz abiogénique devait s'imposer sur le marché international, cela prendrait plusieurs décennies avant que son introduction soit de conséquence. Le gaz abiogénique serait vraisemblablement absorbé par l'immense demande de gaz naturel, à la fois en utilisations traditionnelles (cuisson, chauffage domiciliaire et procédés industriels) et comme source de l'hydrogène destiné à l'intégration des ressources fossiles et aux produits qui le consomment.

ANNEXE 4 : LES NUMÉRAIRES DE L'ÉNERGIE, VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

On peut comparer l'énergie à une sorte de monnaie. Cette monnaie a cours légal et rend possible des transactions financières, mais n'est pas, en soi, une source de richesse. Cette monnaie permet des transactions énergétiques; elle n'est pas une source d'énergie, mais elle est souvent le facteur qui détermine si une source peut, ou ne peut pas être mise à contribution. Les termes "sources primaires" et "sources secondaires" sont parfois utilisés pour "source" et "monnaie". D'après nous, cet usage est fâcheux : dire "primaire" ou "secondaire", cela suppose que ces "sources" ont même statut, ou, pire encore, même fonction.

On dit parfois aussi "porteur" d'énergie ou comme dans ce rapport, "vecteur énergétique". Le terme "vecteur" semble véhiculer un sens plus vaste que celui de "porteur", non seulement parce que le produit en question doit être stocké en plus d'être transporté, mais également du fait que la nature du vecteur définit la nature de la transaction énergétique accomplie. Par exemple, il n'est pas indifférent d'utiliser de l'électricité ou du kérosène si l'on veut qu'un avion vole ou qu'un ordinateur fonctionne.

ANNEXE 5 : EXPERTS-CONSEILS ET PERSONNES RESSOURCES

Pendant le déroulement de ses travaux, le Comité consultatif a sollicité la collaboration d'organismes et de personnes intéressés qui possédaient des connaissances sur les système d'énergie et sur l'hydrogène. Voici la liste de ces personnes et de ces organismes :

1. Le Conseil de l'industrie de l'hydrogène

Un sous-comité du Comité consultatif a rencontré le Conseil de l'industrie de l'hydrogène à Montréal, à l'automne de 1985. Le Conseil a été invité à produire un document succinct d'information ayant trait aux activités liées à l'hydrogène au Canada et dans le reste du monde, de même qu'à présenter des suggestions précises sur les perspectives de l'hydrogène au Canada. Le Conseil a remis au Comité consultatif des rapports utiles sur ses activités. Le président du Comité consultatif s'est aussi rendu à Montréal en mars pour présenter un bref aperçu des discussions des comités, de même que pour solliciter de nouvelles suggestions. Enfin, une réunion a eu lieu le 8 octobre 1986 avec M. Richard Champagne, qui a alors présenté plusieurs exemples de possibilités qui s'offrent au Canada.

2. Le Bureau de recherche et de technologie des sables bitumineux de l'Alberta (BRTSBA)

Un sous-comité du Comité consultatif a rencontré le président du BRTSBA, de même que plusieurs membres du conseil du Bureau, à Banff, en décembre 1985. Le BRTSBA a été invité à présenter des suggestions particulières à propos des perspectives de l'hydrogène au Canada. Le BRTSBA a fait de nombreuses suggestions que le Comité consultatif a étudiées. En mars, Le Président du Comité consultatif s'est rendu au BRTSBA. Un des membres du conseil du Bureau, M. Ernie Wiggins, nous a fait profiter de ses compétences, au fur et à mesure que nous prenions conscience des perspectives des sables bitumineux.

3. L'Institut canadien des recherches avancées

Un sous-comité du Comité consultatif a rencontré MM. Ham et Mustard de l'Institut canadien des recherches avancées, afin de discuter des répercussions de l'entreprise de l'hydrogène sur les activités aérospatiales canadiennes.

4. Ministères fédéraux

Pendant l'automne de 1985, des sous-comités du Comité consultatif ont rencontré des représentants d'Énergie, Mines et Ressources, de Transports Canada, de l'Expansion industrielle régionale, du ministère d'État chargé des Sciences et de la Technologie, et d'Environnement Canada. De plus, pendant la durée des travaux, le président du Comité consultatif est resté en communication avec le personnel du ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, du ministère de l'Environnement et du ministère d'État chargé des Sciences et de la Technologie.

5. M. Bryan Taylor, Directeur de l'expansion des affaires, Moly Energy Corporation, Vancouver

En mars, le président du Comité consultatif a rendu visite à M. Taylor, anciennement responsable du Programme national sur l'hydrogène géré par le Conseil national de recherches du Canada. M. Taylor a fait des suggestions utiles relativement à l'implantation d'une agence nationale de l'hydrogène, et sur la forme d'organisation et de gestion dont on pourrait la doter.

6. Ministères provinciaux

Le Comité consultatif a invité par lettre les ministères provinciaux à lui faire part de commentaires sur les aspects de son mandat qui relèvent de la compétence des provinces. Les ministères suivants ont répondu à cette invitation :

Alberta

Ministry of Technology, Research and Telecommunications
Ministry of Transportation
Ministry of Environment
Ministry of Agriculture
Ministry of Energy and Natural Resources
Ministry of Economic Development

Colombie-Britannique

Ministry of Industry and Small Business Development
Ministry of Environment

Manitoba

Ministry of Highways and Transportation
Ministry of Energy and Mines
Ministry of Agriculture
Ministry of Environment and Workplace Safety and Health
Ministry of Industry, Trade and Technology

Terre-Neuve et Labrador

Department of Environment

Île-du-Prince-Édouard

Department of Agriculture
Department of Energy and Forestry

Ontario

Ministry of Agriculture and Food
Ministry of Energy

Québec

Ministère des Transports, responsable du développement régional
Ministère de l'Industrie et du Commerce
Ministère de l'Environnement

Saskatchewan

Province of Saskatchewan Premier's Office
Ministry of Science and Technology
Ministry of Environment
Ministry of Rural Development
Ministry of Highways and Transportation
Ministry of Parks and Renewable Resources

7. Personnes ressources qui ont assisté aux réunions du Comité consultatif

Les trois personnes suivantes avaient été invitées à éclairer de leur expérience et de leurs compétences le Comité consultatif :

- **M. Ben Ball, président de l'International Consortium on Integrated Energy Systems, du Massachusetts Institute of Technology**

Ancien vice-président de la planification à Gulf International, M. Ben Ball a traité de l'utilisation de l'hydrogène pour l'intégration des sources d'énergie renouvelables et non renouvelables à la production de combustibles liquides. Il a aussi décrit les barrières structurelles qui pourraient gêner la coopération entre les industries actives dans ces secteurs.

- **M. Willis Hawkins, conseiller supérieur, société Lockheed**

M. Hawkins, vice-président à la retraite du secteur de la science et du génie de la société Lockheed, a décrit les vastes utilisations que l'on pourrait faire de l'hydrogène pur dans les véhicules alimentés à l'hydrogène, tout en insistant sur les applications à l'aérospatiale. Il a aussi exprimé des vues sur la façon dont le gouvernement peut appuyer et stimuler la croissance des industries et des produits qui innovent sur les marchés commerciaux.

- **M. Kenneth Hare, recteur du Trinity College de l'Université de Toronto**

M. Hare est l'ancien président de l'Université de la Colombie-Britannique et l'actuel président du Conseil de planification du programme sur les climats, en plus de présider l'association Sigma Xi. M. Hare a fait part des dernières données sur les repercussions environnementales de l'utilisation de l'énergie à l'échelon national et planétaire, en insistant particulièrement sur l'accroissement du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère.